

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE  
INDUCCIÓN ALIMENTADOS DESDE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

ING. NARCISO ANTONIO CASTRO CHARRIS



UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

BARRANQUILLA

2022

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE  
INDUCCIÓN ALIMENTADOS DESDE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

NARCISO ANTONIO CASTRO CHARRIS

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en  
Eficiencia Energética y Energías Renovables

TUTOR DEL PROYECTO:

Dr. VLADIMIR SOUSA SANTOS

CO-TUTOR

Dr. JUAN JOSÉ CABELLOS ERAS

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

BARRANQUILLA

2022

## Dedicatoria

Mi proyecto va dedicado especialmente a mi compañera permanente Rosario y a mis hijas e hijos, quienes me han aportado su gran apoyo y la motivación necesaria para alcanzar con éxitos y obtener este nuevo logro dentro de mi carrera. Gracias a ese amor, paciencia y exquisita compañía.

A mis padres (q.e.p.d.) quienes desde la eternidad me guían. A mis hermanas Rosalba, Blanca, Enriqueta y mi sobrina Sandra quienes con sus buenos consejos permanentes me impulsan a conseguir mis propósitos.

*Narciso Antonio Castro Charris*

## **Agradecimientos**

A Dios por darme esta nueva posibilidad de consolidar mis objetivos académicos, personales y laboral, permitiéndome crecer más cada día profesionalmente.

También quiero agradecerle a mis amigos y tutores de tesis de maestría, Dr. Juan José Cabello Eras y Vladimir Sousa Santos, por el empeño, acompañamiento permanente y dedicación al guiarme profesionalmente al desarrollo y culminación de este trabajo.

Agradecer a la Universidad de la Costa, al Departamento de Energía y a la directora del programa de Ingeniería Eléctrica Ing. Eliana Noriega por haberme abierto las puertas y permitirme seguir fortaleciendo mis conocimientos.

Mil gracias a todos.

### Resumen

La tesis de maestría en Eficiencia Energética y Energía Renovable que se presenta tiene como objetivo evaluar la eficiencia energética de motores trifásicos de inducción (MTIs) alimentados desde sistemas fotovoltaicos (SFs). La investigación se origina a partir de estudios que demuestran que los SFs, si bien tiene beneficios ambientales, también producen problemas en los sistemas eléctricos como inestabilidad en la generación de energía, problemas de regulación de frecuencia, generación de armónicos e inestabilidad de potencia reactiva. Estos estudios, sin embargo, no analizan la influencia que puede tener los SFs en la eficiencia de los MTI. En la investigación se comparó las características electromecánicas y la eficiencia de un MTI alimentado desde la red eléctrica en relación con la alimentación desde un SF. Los estudios experimentales demostraron que, con la alimentación desde el SF, se incrementó la tensión y los armónicos de tensión y corrientes en comparación con la alimentación desde la red eléctrica. Estos problemas, producidos por el inversor, redujeron la eficiencia del MTI hasta en un 2,7% comparado con la alimentación desde la red eléctrica. El MTI modelado en condiciones reales de variación de la carga, consumió 2,6 % más de energía alimentado desde el SF, en relación con la alimentación desde la red eléctrica. Los resultados de la investigación pretenden llamar la atención a las entidades responsables de la instalación y operación de SF, que deben considerar la calidad de la energía suministrada por estos sistemas, pues se puede afectar la operación de los MTI y aumentar el consumo de energía.

Palabras Clave: Sistemas fotovoltaicos, motor trifásico, eficiencia energética, calidad de energía

### **Abstract**

The master's thesis in Energy Efficiency and Renewable Energy that is presented aims to evaluate the energy efficiency of three-phase induction motors (MTIs) powered by photovoltaic systems (SFs). The research originates from studies that show that SFs, although they have environmental benefits, also cause problems in electrical systems such as instability in power generation, frequency regulation problems, generation of harmonics, and reactive power instability. These studies, however, do not analyze the influence that SFs may have on the efficiency of MTI s. The research compared the electromechanical characteristics, and the efficiency of an MTI fed on the electrical network to the feed from a SF. The experimental studies showed that, with the power supply from the SF, the voltage and the harmonics of voltage and currents were increased compared to the power supply from the electrical network. These inverter-induced problems reduced the efficiency of the MTI by as much as 2.7% compared to powering from the utility grid. The MTI modeled in actual conditions of load variation consumed 2.6% more energy fed from the SF than the feed from the electrical network. The results of the investigation are intended to draw the attention of the entities responsible for the installation and operation of SF, which must consider the quality of the energy supplied by these systems since it can affect the operation of the MTI s and increase energy consumption.

**Keywords:** Photovoltaic systems, three-phase motor, energy efficiency, power quality

## Contenido

Introducción.....	11
Descripción del problema .....	15
Objetivos.....	19
Metodología .....	19
Capítulo 1. Características de los SF, problemas de calidad de energía y eficiencia	
1.1 Componentes y funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos.....	22
1.3 Problemas de calidad de energía generados por sistemas fotovoltaicos.....	25
1.4 Afectación de los problemas de calidad de energía en los MTI.....	32
Capítulo 3.....	46
Resultados de la evaluación del mti conectado a la red eléctrica y al sf .....	46
3.1 Resultados de la evaluación de la operación del MTI a .....	46
Referencias.....	64

## Lista de tablas

## Tablas

Tabla 1. Datos de los paneles solare e inversor del SF.....	37
Tabla 2. Datos del MTI, el freno de polvo y el controlador del freno de polvo .....	40
Tabla 3. Datos del analizador de redes y de la tarjeta de adqusición de datos .....	43
Tabla 4. Parametros eléctricos y mecánicos medidos y registardos para analisis .....	43
Tabla 5. Mediciones del MTI conectado a red eléctrica.....	46
Tabla 6. Mediciones del MTI conectado al SF .....	47



## Lista de Figuras

## Figuras

Figura 1. Crecimiento anual de suministro de energía a partir de FER.....	15
Figura 2. Contribución de las fuentes de energías a la generación eléctrica.....	15
Figura 3. Contribución de las fuentes de energías a la generación eléctrica en Colombia.....	15
Figura 4. Componentes de un sistema fotovoltaico .....	22
Figura 5. Configuraciones de los SFs. ....	25
Figura 6. Posición del PCC, (a) en el primario del transformador, (b) en el secundario..	30
Figura 7. Flujo de corrientes armónicas.....	31
Figura 8. Flujo de potencias en los motores eléctricos.....	38
Figura 9. Instalación de SF en laboratorio de máquinas de la CUC, (a) paneles solares, (b) inversor DC/AC. ....	38
Figura 10. Banco de ensayo de motores (a) MTI-Freno de polvo,(b) Controlador del freno .....	40
Figura 11. Dispositivos de medición y adquisición de datos, (a) DRANETZ POWER VISA, (b) Tarjeta de adquisición de datos “National Instruments NI USB 6009” .....	38
Figura 12. Tensión de alimentación del MTI conectado a red eléctrica y al SF.....	49

Figura 13. Factor de potencia medidos en el MTI conectado a red eléctrica y al SF.....	50
Figura 14. THD de tensión en el MTI conectado a la red y al SF.....	51
Figura 15. Facor K medidos en el MTI conectado a red y al SF.....	52
Figura 16. Consumo de corriente del MTI conectado a la red eléctrica y al SF.....	53
Figura 17. Demanda de potencias eléctricas del MTI conectado a la red eléctrica y al SF.....	54
Figura 18. Eficiencia del MTI conectado a red eléctrica y al SF.....	55
Figura 19. Factor de carga modelado en el MTI objeto de estudio.....	56
Figura 20. Modelo de regresión lineal de la potencia eléctrica del MTI alimentado desde la Red eléctrica y el SF .....	57
Figura 21. Demanda de potencia eléctrica del MTI conectado a la red eléctrica y al SF durante 5 horas de opreación. ....	58
Figura 22. Consumo de energía por el MTI conectado a la red eléctrica y al SF durante 5 horas de opreación. ....	59

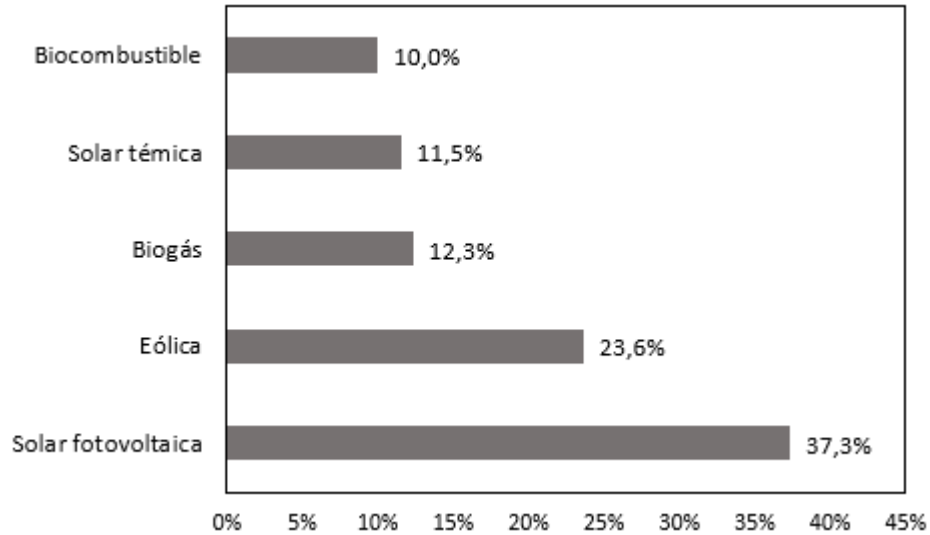
### **Introducción.**

Este estudio surge a partir de la necesidad de investigar sobre los efectos de la integración masiva de los SFs en el SEN de Colombia, específicamente en la eficiencia de los MTI. Los SFs son los que más expansión tienen a nivel mundial y los de mayor proyección en Colombia (Eras et al., 2019). Los MTI por su parte, son las cargas más representativas en el consumo de energía eléctrica del sector industrial y se encuentra integrado en la mayor parte de esos procesos (Sagastume Gutiérrez et al., 2018).

Los SFs forman parte de las fuentes de energía renovables (FER). El uso de las FER, como fuente de generación de la energía eléctrica, se ha acelerado en los últimos tiempos como estrategia principal de descarbonización de la economía para el cumplimiento del tratado ambiental de París 2015 (UNFCCC, 2015). Este tratado tiene como objetivos principales reducir las emisiones de gases invernadero y combatir los efectos negativos del cambio climático (Eras et al., 2019; Sagastume Gutiérrez et al., 2018; UNFCCC, 2015; Zerrahn, Alexander; Schill, 2018). Desde 1990 hasta la actualidad, las FER han tenido un crecimiento promedio anual de 2% en el suministro de la energía a nivel global y se distribuye como se muestra en la figura 1.

**Figura 1**

*Crecimiento Anual de Suministro de Energía a partir de FER.*



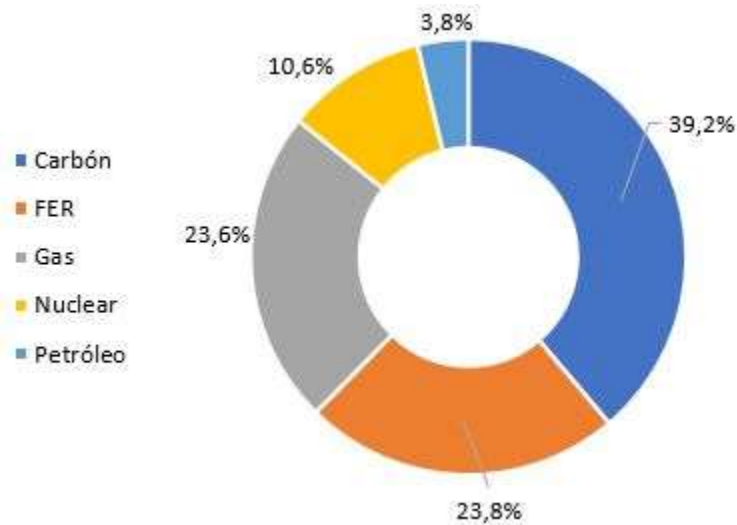
Fuente: Elaboración propia

Entre las principales fuentes de energía en las FER se encuentran la energía solar fotovoltaica con un 37,3%, la energía eólica con un 23,6%, el biogás con un 12,3%, la solar térmica con un 12,3% y los biocombustibles líquidos con un 10% (IEA, 2018).

En la generación de energía eléctrica específicamente, las FER han tenido un crecimiento promedio anual de 3,7% y constituyen el segundo contribuyente de la generación con un 23,8%, después del carbón que representa el 39,2%. Los otros contribuyentes son el gas (23,6%), nuclear (10,6%) y petróleo (3,8%), tal como se muestra en la figura 2 (IEA, 2018).

**Figura 2**

*Contribución de las Fuentes de Energía a la Generación Eléctrica.*



Fuente: Elaboración propia

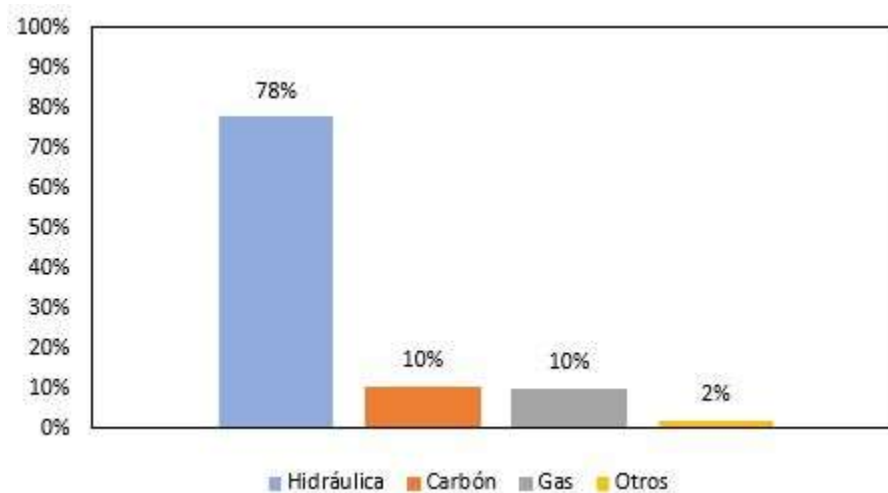
Desde el año 2010 la inversión en generación de energía eléctrica por FER ha crecido en un 55% en China, Estados Unidos, Europa y la India (IEA, 2019). En los países subdesarrollados con crecimiento económico emergente y límites de fuentes energéticas convencionales, las FER se han extendido debido a la reducción del costo de la tecnología y políticas de gobierno (Kim, Park, & Kim, 2017).

En Colombia, como se muestra en la figura 3, la generación de energía eléctrica está compuesta en un 78% de plantas hidroeléctricas, 20% de plantas termoeléctricas de gas y carbón y 2% de generación con otras fuentes de energía (UPME, 2016). Aunque en esta matriz predomina la generación de energía limpia, existen riesgos en la seguridad energética por posible

ausencia de lluvias en algunas épocas del año, lo que conlleva a la necesidad de integrar FER no convencionales (FERNC), a partir de generación fotovoltaica (UPME, 2015).

### Figura 3

*Contribución de las Fuentes de Energía a la Generación Eléctrica en Colombia.*



Fuente: Elaboración propia

En este contexto, con la Ley 1715 del 2014 (Ministerio minas y energía & UPME, 2016) y la Resolución 030 de 2018 (Ministerio de Minas y Energía, 2018), que establecen el marco jurídico para la implementación de FERNC en el sistema eléctrico, junto a investigaciones que demuestran el potencial energético de FERNC en Colombia (Eras et al., 2019), (Aguirre-Mendoza, Díaz-Mendoza, & Pasqualino, 2019; Henao, Rodriguez, Viteri, & Dyner, 2019; Rodríguez-Urrego & Rodríguez-Urrego, 2018; Rueda-Bayona et al., 2019), se espera un impulso en la expansión a corto y mediano plazo de las FERNC en el SEN colombiano.

El propósito de esta tesis de maestría es evaluar la influencia de la alimentación desde un sistema fotovoltaico (SF) sobre la eficiencia energética de los motores trifásicos de inducción (MTI). La investigación se enmarca en los nuevos desafíos que traerá consigo la integración a

gran escala de los SFs en el sistema eléctrico nacional (SEN) de Colombia. La importancia de esta investigación está fundamentada en el aumento del uso de los SFs como una estrategia para la descarbonización de la economía y el cumplimiento del tratado ambiental de París 2015. Los SFs, si bien trae beneficios ambientales y de sostenibilidad energética, también representa nuevos desafíos al funcionamiento de los sistemas eléctricos y los equipos de uso final.

Los estudios recientes demuestran las afectaciones de la penetración de SFs en el funcionamiento de los sistemas eléctricos, debido a su naturaleza de funcionamiento variable y el uso de dispositivos electrónicos para su operación. Un ejemplo de esta problemática es la intermitencia en la generación de energía eléctrica, distorsión de la forma de onda, falta de potencia reactiva y problemas de la regulación de tensión. Estos estudios, no evalúan el impacto de los SFs en la eficiencia energética de los MTI, sin embargo, los MTIs representan una de las cargas eléctricas más importantes en los sistemas eléctricos, y en el sector industrial, se estima que consumen alrededor del 68% de la energía eléctrica.

### **Descripción del problema**

El aumento en la penetración de FERNC a nivel global, si bien es una buena alternativa para los escenarios energético y medio ambiental actual, implica nuevos retos para la operación del sistema eléctrico y los equipos de uso final. A continuación, se describen varios estudios que analizan algunas de estas problemáticas.

El principal cambio que implica el uso creciente de FER es en los modos de producción de energía eléctrica que pasa de generarse desde grandes unidades bajo el control de un operador de red, a pequeñas unidades conectadas a la red de distribución o a fuentes de energías renovables, cuya disponibilidad y producción es muy variable según el comportamiento del clima (Rönnberg

& Bollen, 2016). En relación a la problemática de la intermitencia, en (Basu, 2019; Pérez-Díaz, Chazarra, García-González, Cavazzini, & Stoppato, 2015; Pérez-Díaz & Jiménez, 2016) se proponen algunas soluciones que suple los momentos de interrupción del servicio que ocurre fundamentalmente en los SFs.

Las redes de distribución que presentan FER a diferencia de las redes convencionales, poseen un flujo de potencia bidireccional que genera problemas de regulación de tensión. En (Azzouz, Farag, & El-Saadany, 2017; Dib, Ramzi, & Nejmi, 2019; Ren et al., 2018) se evalúa esta problemática y se proponen varios métodos de regulación. Otro problema es la regulación de frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia con alta penetración de SF ocasionado por la variabilidad en su generación. Estos problemas son analizados en (Habib, Sou, Hafeez, & Arshad, 2018; Jie, Tsuji, & Uchida, 2017; Kermani, Dahraie, & Najafi, 2016; Mu, Jin, & Xu, 2016; Shim, Verbic, Zhang, & Hur, 2018; Tang et al., 2019; Tungadio & Sun, 2019; Ye, Qiao, & Lu, 2019; S. Zhang, Mishra, & Shahidehpour, 2017), y además se proponen soluciones de regulación y control en sistemas eléctricos de transmisión, distribución y redes inteligentes.

Los diseños y selección de los esquemas de protección en sistemas eléctricos con máquinas sincrónicas convencionales están bien estandarizados desde hace mucho tiempo. Sin embargo, con la penetración de FER, han surgido nuevos retos debido a que cambia el nivel de falla y la alimentación es intermitente (Brahma & Girgis, 2004). Además, se pueden ocasionar disparos indeseados en los relés de sobrecorrientes de los alimentadores de distribución y su impacto puede llegar a los relés de distancia del sistema de transmisión (Telukunta, Pradhan, Agrawal, Singh, & Srivani, 2018). Alternativas de solución a estos nuevos retos son analizadas en (Brahma & Girgis, 2004; Fang, Jia, Yang, Li, & Bi, 2019; Telukunta et al., 2018).



Con la generación distribuida empleando FER se ha evidenciado un deterioro en la calidad de la energía, específicamente un incremento de armónicos en los puntos de acoplamiento común (PCC por sus siglas en inglés) producido fundamentalmente por los dispositivos electrónicos de los SFs (Liang & Andalib-Bin-Karim, 2018). Además, la instalación de FER en diversos puntos de los sistemas de distribución y su característica variable ha traído consigo otro problema en los operadores de redes denominado inestabilidad armónica (J. B. Kwon et al., 2016). En este sentido, diversos estudios como los reportados en (J. B. Kwon et al., 2016; J. Kwon, Wang, Bak, & Blaabjerg, 2015; Liang & Andalib-Bin-Karim, 2018), han venido trabajando en nuevos modelos de análisis y mecanismo de control para mitigar estos efectos negativos.

Otro de los parámetros que han sido afectados por la creciente penetración de las FER, es la potencia reactiva, especialmente por el uso de convertidores electrónicos de potencia que realizan la interfaz entre las FER y las redes eléctricas. La reducción de potencia reactiva en el sistema eléctrico de potencia afecta la regulación de la tensión, la estabilidad dinámica y transiente (Sarkar, Meegahapola, & Datta, 2018). En este sentido se ha venido investigando en nuevas tecnologías que permitan suministrar la potencia reactiva necesaria desde los mismos dispositivos electrónicos que se emplean en la FER (Freddy, Lee, Moon, Lee, & Rahim, 2017; Kabiri, Holmes, McGrath, & Meegahapola, 2015; Molina-García et al., 2017; Shen et al., 2017; B. Zhang et al., 2016).

Los estudios descritos analizan los problemas producidos por las FER enfocado en los sistemas eléctricos de potencia, sin embargo, en ningún caso se evalúa el impacto en la operación de los equipos de uso final, entre ellos, los MTI. Adicionalmente, aunque varios estudios han evaluado la operación de los MI en diferentes escenarios de problemas de calidad de la energía (Rueda-Bayona et al., 2019), (Al-Badri, Pillay, & Angers, 2017; Chirindo, Khan, & Barendse,

2016; Donolo et al., 2018; El-Kharashi, Massoud, & Al-Ahmar, 2019; Kalair, Abas, Kalair, Saleem, & Khan, 2017; E.C. Quispe, López, Ferreira, & Sousa, 2018; Enrique C. Quispe, Lopez-Fernandez, Mendes, Marques Cardoso, & Palacios, 2013; Sousa Santos, Cabello Eras, Sagastume Gutierrez, & Cabello Ulloa, 2019), en ningún caso se ha analizado específicamente su funcionamiento cuando están alimentados con FER como los Sfs.

Los estudios descritos demuestran que con los SFs se pueden presentar problemas como la distorsión armónica, falta de potencia reactiva, mala regulación de tensión e intermitencia en la potencia debido a las condiciones climáticas. Estos son problemas que afectan a los MTI y que deben de ser estudiados. El análisis de la eficiencia de los MTI alimentados por SFs tiene gran importancia, debido a que estos equipos consumen alrededor del 68% de la energía eléctrica demandada por la industria y el 46% del consumo eléctrico total a nivel mundial (Enrique C. Quispe et al., 2013).

A partir de lo analizado surge la siguiente pregunta problema: **¿Qué efectos puede tener la influencia de la alimentación desde sistemas fotovoltaicos (SFs) sobre la eficiencia energética de los MTI?**

Para abordar esta problemática se proponen los objetivos siguientes:

## **Objetivos**

### **Objetivo General.**

Evaluar la eficiencia energética de MTIs alimentados desde SFs.

### **Objetivos Específicos.**

- Caracterizar las principales configuraciones de los SFs, los problemas de calidad de la energía que pueden generar y sus posibles afectaciones en el funcionamiento de MTI.
- Evaluar en condiciones de laboratorio y mediante la simulación de condiciones reales los efectos del suministro de energía desde SFs, en la eficiencia de MTI.
- Proponer criterios de selección y operación de SFs que alimenten sistemas eléctricos con presencia de MTI, para evitar afectaciones en su eficiencia por problemas de calidad de la energía.

## **Metodología**

En el proyecto se aplicó la metodología analítico - deductiva, verificando cada uno de las variables eléctricas y mecánicas que influyen en los MTI al ser alimentados con fuentes de generación fotovoltaicas. A continuación, se describe la metodología empleada para el cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos del proyecto.

Para el desarrollo del primer objetivo específico “Caracterizar las principales configuraciones de los Sistemas Fotovoltaicos (SFs), los problemas de calidad de la energía que pueden generar y sus posibles afectaciones en el funcionamiento de los MTI”, se realizó la revisión del estado del arte sobre estudios relacionados con los SFs, sus configuraciones, los problemas de calidad de la energía que puedan provocar y su posible afectación en la eficiencia de los MTI. Los aspectos

teóricos encontrados en los estudios sirvieron como marco de referencia para la evaluación de la alimentación de SFs con diferentes configuraciones en la eficiencia de MTI. Los resultados de la evaluación en los MTI fueron comparados con los problemas identificados en las redes eléctricas.

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico “Evaluar en condiciones de laboratorio y mediante la simulación de condiciones reales los efectos del suministro de energía desde SFs, en la eficiencia de MTI”, se adquirió, instaló y ajustó un SF trifásico conectado a la red eléctrica sin baterías en el bloque de laboratorios de la Universidad de la Costa (CUC). Los equipos contaron con instrumentos de medición que registraron y transmitieron la información en tiempo real para después ser procesadas en equipos de cómputo. En la segunda parte de este objetivo se preparó un banco de ensayo del MTI de capacidad de 1,1 kW compuesto por un sistema de control que permitió variar la carga en el MTI y se analizó la incidencia de los SFs en la eficiencia del MTI. La tercera actividad consistió en elaborar el diseño experimental para evaluar en el banco de ensayo del MTI, la incidencia de los SFs en su eficiencia. Los experimentos consistieron en comparar las características operacionales y la eficiencia del MTI alimentado desde el SF con relación a la alimentación desde la red eléctrica. En la siguiente actividad se ejecutaron los pasos del diseño experimental, se recopilaron las mediciones, se procesaron los resultados y se compararon los resultados de la eficiencia de los MTI entre la alimentación del SF con relación a la alimentación desde la red eléctrica, además se identificaron las variables que más afectaron la eficiencia de los MTI.

Para la ejecución del tercer objetivo “Proponer criterios de selección y operación de SFs que alimenten sistemas eléctricos con presencia de MTI, para evitar afectaciones en su eficiencia por problemas de calidad de la energía”, se tomó como referencia los parámetros que más

afectaron la operación y la eficiencia de los MTI. A partir de estos resultados, se describieron las propuestas que deben de tenerse en cuenta durante la selección y operación de SFs que alimenten circuitos con presencia de MTI, para que se afecten lo menor posible, la eficiencia de operación de los MTI. Por último, se procedió a elaborar el informe correspondiente de los resultados obtenidos de la investigación.

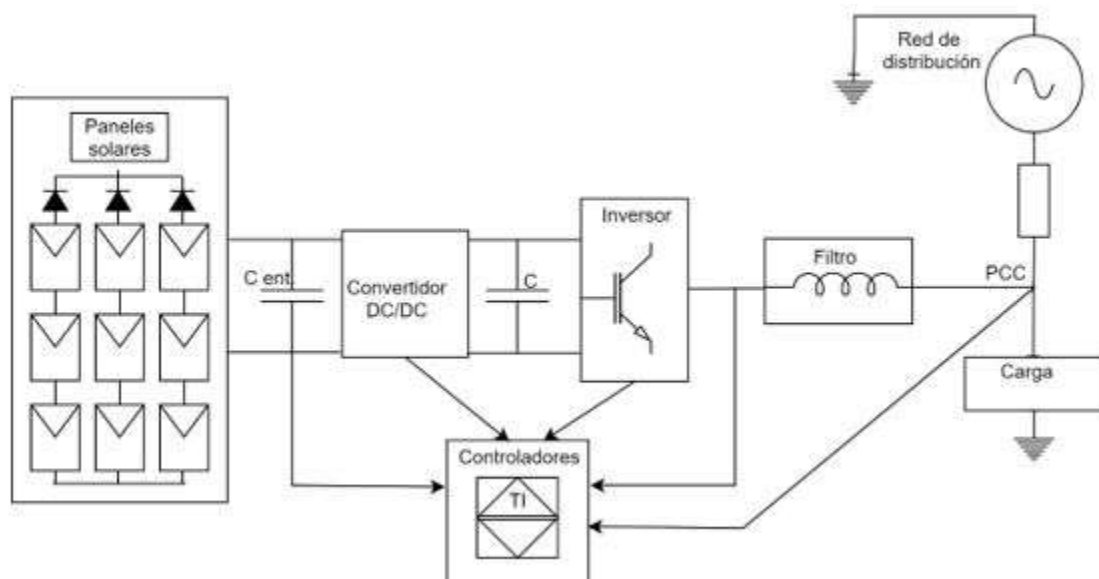
## Capítulo 1. Características de los SF, problemas de calidad de energía y eficiencia de los MTI

### 1.1 Componentes y funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos.

Los SFs están compuestos fundamentalmente por paneles solares, reguladores, convertidores y baterías que pueden complementarse con sistemas de control para mejorar su eficiencia y presentan la configuración básica mostrada en la figura 4 (Mohanty, Muneer, & Kolhe, 2016).

**Figura 4**

*Componentes de un Sistema Fotovoltaico.*



Fuente: Elaboración propia

La celda solar fotovoltaica (CSF) o panel solar, es el elemento base de los SFs. Este elemento funciona a partir del efecto fotoeléctrico que ocurre en materiales semiconductores al transferirse energía desde el fotón de la luz solar a los electrones libres de los semiconductores. La cantidad de electrones que pueden moverse y generar energía en los semiconductores

depende de varios factores como la temperatura, la composición, el campo eléctrico y el campo magnético entre otros (Pierret, 1983). Así mismo, el diseño de las CSFs se puede modificar, de tal forma que mediante el uso de varias capas permitan mejorar la captura de fotones, evitar que la luz se refleje y guiarla para que penetre de forma más efectiva dentro de la celda, evitar la recombinación, minimizar la resistencia en serie y aumentar la resistencia en paralelo, entre otros factores que permiten aumentar la eficiencia de las CSFs.

La característica principal de la CSF para su aplicación es la curva característica intensidad o corriente-tensión (I-V) en condiciones de iluminación solar. Dentro de la curva característica, los parámetros más importantes son la corriente de corto circuito, la tensión en circuito abierto, la corriente del punto máximo de potencia, la tensión del punto máximo de potencia y el factor de forma o factor de llenado (Tiwari, G.N. & Dubey, 2010).

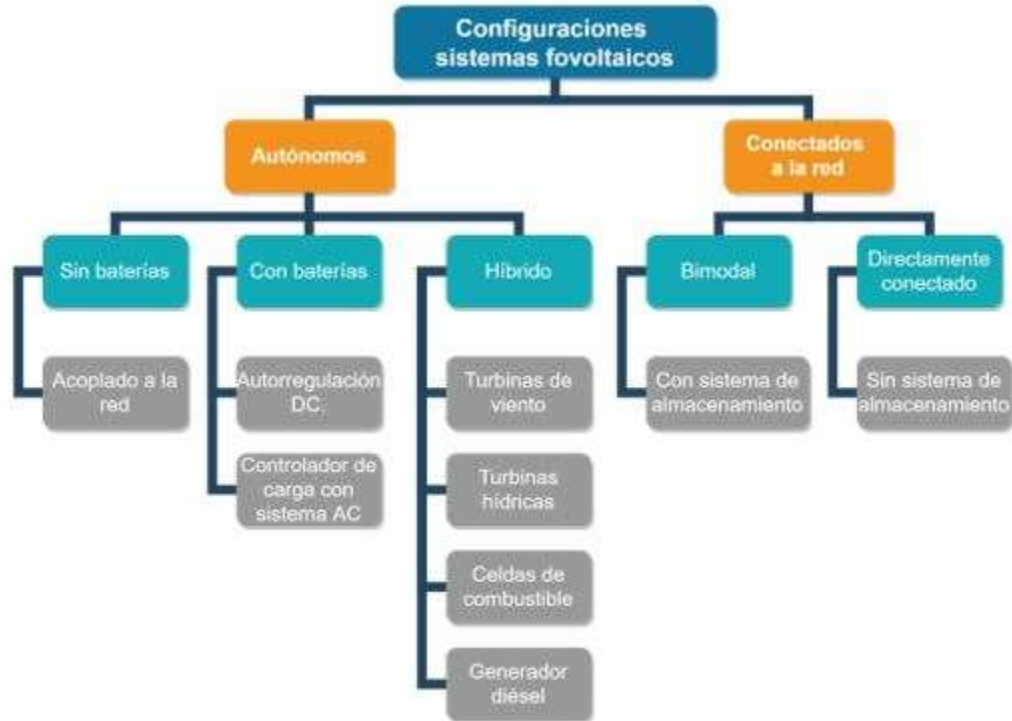
En el SF, además de la CSF que es el dispositivo generador de energía eléctrica, el convertidor o inversor es el equipo fundamental puesto que es el que entrega la energía al usuario final, además controla el SF y le permite la sincronización con la red eléctrica.

## **1.2 Configuración y efectos de los sistemas fotovoltaicos.**

Los SF de acuerdo con su aplicación, pueden presentar diferentes configuraciones entre las que se encuentran los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA) y los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red (SFR), como se puede observar en la figura 5 (Hernández-Callejo, Gallardo-Saavedra, & Alonso-Gómez, 2019).

**Figura 5**

*Configuraciones de los SFs.*



Fuente: Elaboración propia

Los SFA pueden utilizarse sin las baterías y directamente acoplados a la carga o empleando baterías con autorregulación CC o con controlador de carga con sistema AC. La otra forma del SFA es con el SF híbrido que incluye el posible uso de turbinas de viento o eólico, turbinas hidráulicas, celdas de combustible o generador diésel entre otros.

Los SFR pueden estar conformados por un SF bimodal con sistema de almacenamiento o directamente conectado al usuario sin sistema de almacenamiento.



### 1.3 Problemas de calidad de energía generados por sistemas fotovoltaicos.

Investigaciones recientes han publicado varios aspectos relacionados con la mejora del funcionamiento de los componentes de los SFs y la disminución de los efectos negativos en el sistema eléctrico. De estos componentes, los convertidores de potencia son los que mayor atención han recibido por su incidencia en el funcionamiento de los SFs. En (Fernandes, Almeida, Guedes, Sguarezi Filho, & Costa, 2017) se modela una estrategia de control de un SF conectado a través de un convertidor de potencia usando Matlab/Simulink y se valida en varios escenarios a diferentes irradiancias. En (Yu, Konstantinou, Hredzak, & Agelidis, 2015) se propone un convertidor de puente en cascada H aplicable a media tensión y alta potencia que ofrece una mayor confiabilidad contra fallas. El convertidor propuesto es capaz de mantener corrientes de red eléctrica trifásicas equilibradas durante fallas con una generación de energía desigual causada por una irradiación solar irregular y/o por las diferentes temperaturas de cada módulo.

“Un nuevo convertidor elevador de potencia con configuración de entrada en paralelo y salida en serie” es presentado en (Hu & Gong, 2015). La reducción de la ondulación de la corriente de suministro se logra mediante el acoplamiento de inductores en paralelo y de un condensador en serie con los devanados del inductor. En (Bhaskar, Padmanaban, & Blaabjerg, 2017) se presenta los resultados del diseño e implementación de un convertidor sin transformador de etapas múltiples y autobalanceado. “La configuración de un convertidor de potencia multinivel para sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica” es discutida en (Duman, Marti, Moonem, Kader, & Krishnaswami, 2017). El diseño es modular, reutilizable y escalable, además el convertidor agrega un estabilizador de tensión para cada uno de los módulos que se instalarán.

“La operación de un SF, además de la generación, está soportado por otros procesos como el monitoreo, control, simulación, optimización, diagnóstico de fallas, parada de producción, inicio de producción y la operación de todos estos elementos” (Zhao, Lu, & Yuan, 2000).

Con el fin de estimar la producción fotovoltaica, es necesario anticipar el valor del recurso existente que es la irradiancia. En el área de pronóstico, el uso de Redes Neuronales Artificiales está muy extendido (Monteiro, Guimarães, Moura, Albertini, & Albertini, 2017), (Noriega-Angarita, Sousa-Santos, Quintero-Duran, & Gil-Arrieta, 2016). En (Thao & Uchida, 2017) se propone una estrategia de control basada en lógica difusa con dos niveles jerárquicos, para lograr un ajuste adecuado de la potencia activa de la red eléctrica.

El uso de SFs para la regulación de la tensión de la red eléctrica es estudiado en (Solanki & Patel, 2017). El flujo de potencia se analiza mediante simulaciones en MATLAB/Simulink. Los autores demuestran que la creciente penetración de las FER provoca problemas de regulación de tensión en el PCC, por lo tanto, los inversores que se empleen deben de tener la capacidad de impedir estos problemas.

En (Rajesh, Dash, Bayinder, Sridhar, & Rajagopal, 2017) se propone un enfoque de implementación de SFs adaptativos con seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) para el funcionamiento de una microred en modo isla. Los autores proponen una coordinación eficiente entre todos sus elementos: control del inversor V-f y P-Q, control del MPPT y control del almacenamiento. Se empleó como estrategia de control el mantenimiento del estado de carga (SOC) de la unidad de la batería.

En (Kusakana, 2015) se analiza: el problema de la optimización en un sistema híbrido compuesto por un SF y un generador diésel. El objetivo del modelo propuesto es encontrar la programación óptima de la producción de energía minimizando los gastos de combustible del generador durante el tiempo de operación. El control del sistema híbrido se evaluó en dos escenarios, en el primero se analizó el control de operación continuo del generador y en el segundo mediante secuencias de encendido / apagado. Como criterios de análisis se tuvo en cuenta minimizar el costo de operación del sistema híbrido manteniendo el flujo óptimo de energía, considerando la intermitencia de la energía en el SF, el SOC de la batería y la demanda de carga. Los resultados del estudio demostraron un ahorro de operación significativo en este tipo de sistema.

Las plantas de energía fotovoltaica deben de cumplir con los requisitos de la red eléctrica a la que están conectadas, especialmente en relación con los problemas de calidad de la energía.

El término de calidad de la energía se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos, que caracterizan la tensión y la corriente durante un determinado tiempo, en un lugar específico del sistema de potencia. La calidad de la energía es afectada por distorsiones electromagnéticas que alteran el funcionamiento de un dispositivo, un mecanismo o sistema, reduciendo su vida útil (IEEE, 2009).

Entre los principales fenómenos causantes de distorsiones electromagnéticas a baja frecuencia se encuentran:

- Los armónicos e interarmónicos.
- Las fluctuaciones de tensión.
- Variaciones de tensión e interrupciones de corta y larga duración.

- Desequilibrio de tensión.
- Variación de frecuencia.
- Tensiones inducidas de baja frecuencia.
- Señales de corriente directa en redes de corriente alterna.

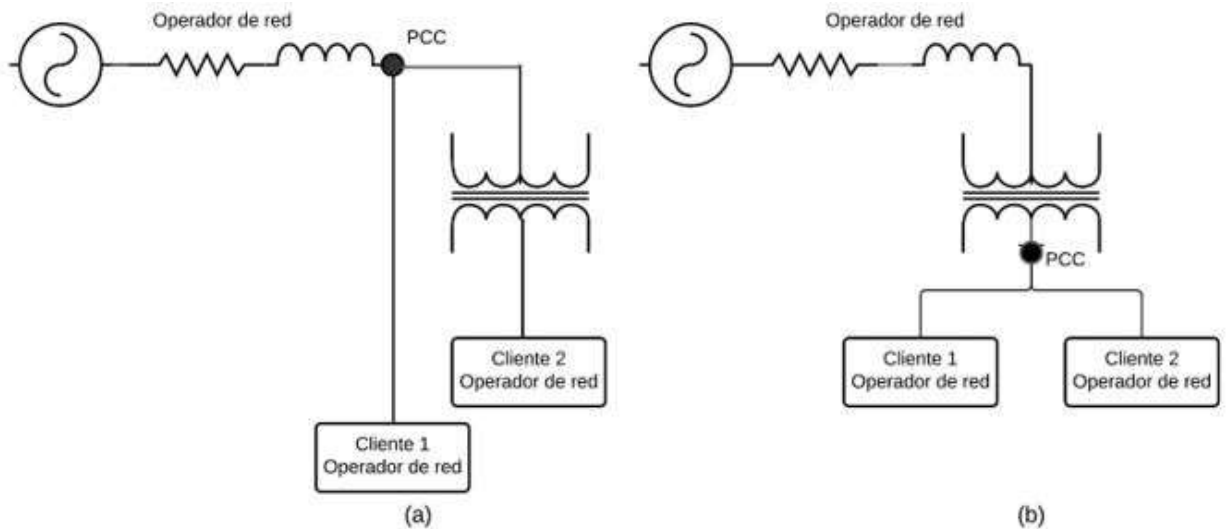
Los factores que afectan la perturbación de la energía fotovoltaica son el tamaño de la planta fotovoltaica, la tensión de conexión, la potencia de cortocircuito en la interconexión y el grado de penetración del sistema (Hernández, Ortega, De La Cruz, & Vera, 2011). En el caso de las plantas de energía fotovoltaica, los principales problemas de calidad de energía son el contenido de armónicos, el parpadeo, las variaciones de tensión y la resonancia armónica (Ortega, Hernández, & García, 2013).

Los armónicos, definidos como tensiones o corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental del sistema, son de los problemas que más preocupan. Las corrientes armónicas aumentan las pérdidas de energía en los MTI, sobrecalientan el conductor neutro y los transformadores y pueden causar un mal funcionamiento de los dispositivos de protección.

Según la norma IEEE-519 (IEEE, 2014) e IEEE-1159 (IEEE Std 1159, 2019), la verificación de que los armónicos generados por los SFs no sobrepasan los límites de establecidos debe de realizarse en el PCC (Ver figura 6). El PCC puede estar localizado en el primario o secundario del transformador, dependiendo de los puntos de conexión de otros clientes.

**Figura 6**

*Posición del PCC (a) en el Primario del Transformador, (b) en el Secundario.*

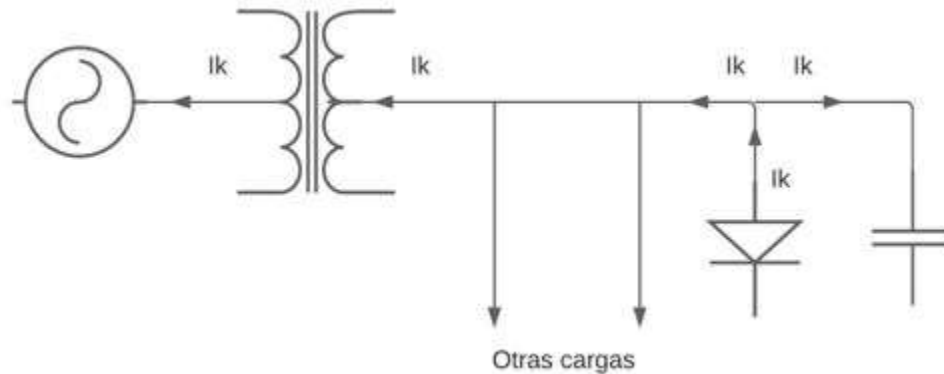


Fuente: Tomado de IEEE Std 1159 (2019)

Otra de las características que debe de tenerse en cuenta con la inserción masiva de SFs, es que las corrientes armónicas tienden a fluir desde las cargas no lineales (fuentes armónicas) hacia la impedancia más baja, que generalmente son la fuente de la red eléctrica. Como se muestra en la figura 7, aunque la impedancia de estas fuentes suele ser mucho más baja que las impedancias de las rutas paralelas de las cargas, la corriente armónica se divide según las relaciones de impedancia.

**Figura 7**

*Flujo de Corrientes Armónicas.*



Fuente: Tomado de IEEE Std 1159 (2019)

Los armónicos más altos fluirán a los condensadores que tienen una impedancia baja a las frecuencias altas IEEE-519 (IEEE, 2014). La interacción entre los armónicos generados por los SFs y las cargas no lineales pueden producir fenómenos de resonancia que son muy perjudiciales para la operación del sistema eléctrico (Chidurala, Saha, & Mithulananthan, 2016).

Los armónicos son una preocupación, ya que las corrientes armónicas aumentan las pérdidas de energía, sobrecalientan el conductor neutro y los transformadores y pueden causar un mal funcionamiento de los dispositivos de protección (IEEE, 2014).

La magnitud y el orden de los armónicos que las unidades fotovoltaicas pueden introducir en la red eléctrica dependerán en gran medida de la tecnología del inversor de potencia. Los diseños recientes basados en IGBT con tecnología PWM producen menos contenido de armónicos que los inversores más antiguos basados en tiristores (Vita, Alimardan, & Ekonomou, 2016). En (Sidrach-De-Cardona & Carretero, 2005) se estudiaron cinco inversores diferentes durante días de cielo despejado y parcialmente nublados. Los resultados muestran que la

distorsión armónica depende de la potencia de salida del inversor. En (Langella et al., 2016) y (Chicco, Schlabbach, & Spertino, 2009) se obtuvieron resultados similares.

La distorsión armónica también depende de la cantidad de plantas eléctricas conectadas al sistema eléctrico y su ubicación (Kadir, Khatib, & Elmenreich, 2014). En (Ortega et al., 2013) presentan una metodología para medir y evaluar la calidad de la energía en SFs basados en las normas IEC. En el trabajo se muestra un estudio de caso correspondiente a una gran planta de energía conectada a un alimentador de media tensión. Según el estudio, con bajos intervalos de potencia, la emisión de armónicos es alta.

Los interarmónicos también son una preocupación creciente. Su causa principal es el comportamiento no síncrono de los subsistemas eléctricos de alimentación electrónica conectada, es decir, el lado de CC del convertidor y el lado de CA del inversor (Testa et al., 2007). En (Langella et al., 2016) se analiza la emisión interarmónica en un inversor fotovoltaico, señalando el control MPPT como una posible causa para frecuencias por debajo de 100 Hz. También se muestra cómo, a más de 100 Hz, la distorsión armónica de alta frecuencia puede tener un impacto significativo. En (Hariri & Faruque, 2014) se simularon diferentes unidades de generación conectadas a una red de distribución, logrando que los armónicos inyectados no excedan los límites de THD ya que, aunque son de alto orden, pueden tener un impacto en los dispositivos de comunicación de red.

El sistema fotovoltaico correspondiente a 96 casas en los Países Bajos fue simulado en (Benhabib, Myrzik, & Duarte, 2007), considerando diferentes escenarios de cargas no lineales conectadas, obteniéndose en algunos casos, valores de THD de corriente y tensión superior al 5%. En (Chidurala et al., 2016) se realizó un estudio similar para una red australiana, analizando el impacto de los armónicos inyectados en el factor  $k$  de un transformador y demostrando que los

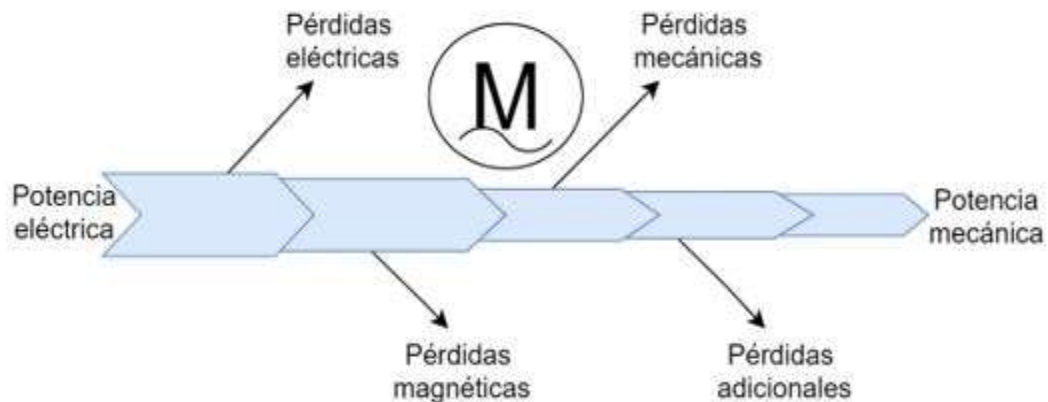
THD de corriente y tensión podrían provocar sobrecargas y calentamiento de transformadores debido a las altas penetraciones fotovoltaicas.

#### 1.4 Afectación de los problemas de calidad de energía en los MTI

Los MTI son máquinas que convierten energía eléctrica en mecánica para el accionamiento de bombas, ventiladores, compresores, bandas transportadoras, entre otras. En los MTI, las pérdidas surgen inevitablemente durante la conversión electromecánica, al transformarse cierta cantidad de energía en calor con carácter irreversible. Estas se dividen en pérdidas eléctricas, pérdidas magnéticas, pérdidas mecánicas y pérdidas adicionales, como se muestra en la figura 8 (Chapman, 2011).

**Figura 8**

*Flujo de Potencia en los Motores Eléctricos.*



Fuente: Elaboración propia

La importancia del análisis de funcionamiento de los MTI radica en que desde el punto de vista energético, estos equipos consumen alrededor del 68% de la energía eléctrica demandada por el sector industrial y el 46% del consumo eléctrico total a nivel mundial (Enrique C. Quispe et al., 2013). Los MTI desde su creación en 1888 por Nikola Tesla (Alger & Arnold,



1976), ha sido diseñada para operar con tensiones sinusoidales equilibradas cercanas a su valor nominal, por lo tanto, cualquier desviación de esta condición afecta su funcionamiento y eficiencia energética (Sousa Santos et al., 2019), (Al-Badri et al., 2017).

Con base a lo explicado, la naturaleza variable de generación en los SF y el uso de dispositivos electrónicos, provocan problemas de calidad de la energía como distorsión armónica y desviación de tensión. Las distorsiones armónicas y sus problemas asociados en los MTI fueron el área de interés de muchos científicos desde la década de 1920. En 1929, este fenómeno se abordó como un ruido innecesario en aparatos eléctricos (SPOONER & FOLTZ, 1929). En la década de 1950, los investigadores comenzaron a involucrar el grave problema de las pérdidas en las máquinas de inducción causadas por los armónicos debido al creciente número de aplicaciones de máquinas de inducción con fuentes de alimentación de convertidor de frecuencia estática. En (Rawcliffe & Menon, 1952), se discutió el hecho de que los MI tienen pérdidas de potencia magnéticas adicionales debido a las ondas de tensión con frecuencias armónicas. En (Jainy, 1964), se utilizó la técnica de Fourier para analizar la forma de onda de tensión que suministra una máquina de inducción. En este estudio se observó que, dependiendo del orden, un componente armónico de tensión puede contribuir a un par positivo ( $3n + 1$ ), negativo ( $3n + 2$ ) o cero ( $3n + 3$ ), donde  $n$  es un número entero. En (Lee, Kim, An, & Hong, 2014) se demuestra que cada orden de armónico tiene su propio deslizamiento, mientras que en el estudio reportado en (Ortmeyer, Chakravarthi, & Mahmoud, 1985), se dividió el efecto de la distorsión de tensión en tres categorías generales: 1) tensión de aislamiento; 2) estrés térmico; y 3) interrupción. A estos estudios primarios se han agregado otros como los reportados en (Donolo et al., 2018), (Gnaciński, Hallmann, Pepliński, & Jankowski, 2019; Santos et al., 2015; Sousa Santos et al.,

2013; Vladimir Sousa, Herrera, Quispe, Viego, & Gómez, 2017) sin embargo, en ningún caso se analiza la influencia de los armónicos generados de los SFs en la operación de los MI.

Con relación a la variación de tensión, la norma NEMA MG-1 (NEMA, 2016) de Estados Unidos establece que el MTI operará correctamente bajo condiciones de funcionamiento con una variación en la tensión de  $\pm 10\%$  y una variación de frecuencia de  $\pm 5\%$ . La norma 600034-1: 2010 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) (IEC, 2010) permite dos rangos de operación diferente; el primero es una variación de  $\pm 5\%$  para la operación continua, y el segundo es una variación de  $\pm 10\%$  para las operaciones intermitentes. La tolerancia en las normas se debe a la influencia que tiene la variación de tensión en la operación y eficiencia del MTI.

La variación de tensión junto a la variación de frecuencia influye directamente en las pérdidas de núcleo del MI (Nour & Thirugnanam, 2017), las que, a su vez, representan alrededor del 15% de las pérdidas totales del MTI operando a plena carga (Saidur, 2010). La peor condición de operación del MTI es cuando se alimenta a baja tensión a una carga superior al 70%, pues la corriente en estado estacionario aumenta y por consiguiente se incrementa la temperatura de operación. En cambio, cierta sobretensión (inferior al 5%) puede disminuir el calentamiento del MTI a medida que disminuye el deslizamiento del MTI, y como resultado, puede mejorar la eficiencia, aunque el factor de potencia disminuye y aumente la corriente de arranque. La variación de la tensión también influye directamente en la característica par/velocidad del MTI, de manera que, con el aumento de la tensión, también aumenta el par y la velocidad, y viceversa (Bonnett, Glatt, & Hauck, 2016). Estos aspectos han sido evaluados en investigaciones como las reportadas en (Bonnett et al., 2016; Nour & Thirugnanam, 2017;

Saidur, 2010), sin embargo, se nota que en ninguno de estos estudios se analiza la influencia de problemas de variación de tensión generados en SFs sobre MI.

Se observa y con base al contexto anterior no se evidencia investigaciones que analicen el impacto que puede traer el incremento de la generación de SFs en la eficiencia de los MI, debido a los problemas de calidad de la energía que produce estos sistemas y que fueron analizados anteriormente.

## **Capítulo 2. Metodología para la evaluación del mti conectado a la red eléctrica y al sf**

### **2.1 Descripción de la instalación experimental**

El experimento para evaluar los efectos del suministro de energía desde SF, en la eficiencia de MTI se realizó en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de la Costa (CUC). En el edificio del laboratorio se instaló un SF compuesto por diez paneles de 340W c/u conectado a la red trifásica con un inversor trifásico DC/AC CHINT POWER sin baterías. El inversor se ubicó próximo al banco de ensayo de motores con la posibilidad de conectarse con los dispositivos de control del MTI. En la figura 9 se muestran los paneles solares y el inversor trifásico y en la tabla 1 se presentan los datos característicos de estos equipos.

**Figura 9**

*Instalación del SF en el Laboratorio de Máquinas de la CUC, a) Paneles Solares, b)*

Inversor DC/AC



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1**

*Datos de los Paneles Solares e Inversor del SF.*

<b>Equipos</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Datos</b>
Paneles Solares	Marca	AMERISOLAR
	Cantidad	10
	Referencia	AS-6P-340W
	Potencia máxima	340W
	Tensión a circuito abierto (Voc)	46,1V
	Corriente de corto circuito (Isc)	9,50 A
	Tensión máxima de operación (Vmp)	37,5 V
	Corriente máxima de operación (Imp)	9,07A
	Tolerancia de energía	0 ± 3%
	Cond. de prueba estándar	E=1000W/m <sup>2</sup> , Tc= 25 °C, AM=1,5

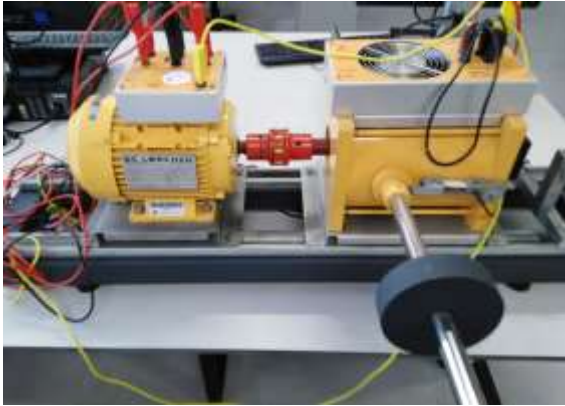
	Tensión máxima del sistema	1000V
	Clasificación máxima de fusible	15A
	Clasificación de resistencia al fuego	Clase C
	Clasificación contra fuego (para EE.UU.)	Tipo 1
	Peso	22,5Kg
	Dimensiones	1956x992x40mm
Inversor DC/AC	Marca	CHINT POWER
	Referencia	CPS SCA 18KTL-T/SA
	Máxima potencia de entrada en DC	800 V
	Rango de tensión DC de entrada	200-750 V
	Máxima corriente DC de entrada	23/23/23 A
	Corriente de cortocircuito	30/30/30 A
	Tensión AC de salida nominal	208/220/240 V
	Frecuencia de salida nominal	50/60Hz
	Corriente AC de salida nominal	46 A
	Corriente AC de salida máxima	48 A
	Potencia de salida nominal a 46A	16,5/17,5/19 kW
	Potencia aparente máxima	20 kVA
	Factor de potencia	±0,8
	Cobertura	IP65
	Rango de temperatura	-25 a +60 °C
Clase de protección	I	

Fuente: Elaboración propia

El MTI se instaló en un banco de ensayos acoplado a un freno de polvo con un sistema de control de carga y medidores de velocidad y par. En la figura 10 se muestra la instalación de estos dispositivos y en la tabla 2 se pueden observar los datos característicos.

**Figura 10**

*Banco de Ensayo de Motores, a) MTI-Freno de Polvo, b) Controlador del Freno.*



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2**

*Datos del MTI, el Freno de Polvo y el Controlador del Freno de Polvo.*

<b>Equipos</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Datos</b>
MTI	Marca	De Lorenzo
	Referencia	DL1021
	Potencia	1,1 kW
	Tensión	220 (Delta) /380V (Estrella)
	Corriente	3,9 A (Delta) /2.2A (Estrella)
	Numero de Fases	3
	Velocidad	3420 rpm
	FP	0,9
	Frecuencia:	60 Hz
	IP	23
Freno de Polvo	Marca:	De Lorenzo
	Referencia:	DL 1019P
	Tensión	0- 20 V
	Velocidad	0- 4000 rpm
	Momento	0- 20 Nm
Controlador de Freno de Polvo	Marca	De Lorenzo
	Referencia	DL 1054 TT
	Alimentación externa	115 VAC

Fuente: Elaboración propia

Las mediciones instantáneas de los parámetros eléctricos se realizaron con el analizador de redes marca DRANETZ POWER VISA. Los parámetros mecánicos de velocidad y momento del MTI se registraron de forma instantánea con la tarjeta de adquisición de datos “National Instruments NI USB-6009”. En la figura 11 se muestran estos dispositivos y en la tabla 3 se presentan los datos característicos.



**Figura 11**

*Dispositivos de Medición y Adquisición de Datos, a) DRANETZ POWER VISA, b) Tarjeta de Adquisición de Datos “National Instruments NI USB-6009”.*



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3**

*Datos del Analizador de Redes y de la Tarjeta de Adquisición de Datos.*

<b>Equipos</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Datos</b>
Analizador de Red	Marca	Dranetz Power Visa
	Peso	4 lb
	Dimensiones	20.3 cm profundidad – 30.5 cm ancho y 6.4 cm alto
	Pantalla	Tipo táctil
	Mediciones	V, I, FP, P, Q, S, Armónicos de V e I
	Modos de registro	Osciloscopio para forma de onda y fasores
	Terminales conexiones	4 conectores tensión, 4 sondas corriente, 1 conector tierra
	Memorias	1 tarjeta tipo extraíble
	Batería	Recargable
	Adaptador	Alimentación externa a 110 V y cargador de batería

Tarjeta de Adquisición de Datos	Marca	“National Instruments”
	Referencia	NI USB-6009
	Registros	Análogo/Digital
	Características	8 entradas, 14-bit, Multifunction I/O

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Descripción de los pasos de evaluación del MTI conectado a la red eléctrica y al SF

Para la evaluación del MTI conectado a la red eléctrica y al SF se implementaron los pasos siguientes:

### 2.2.1 Evaluación experimental.

- Instalación del SF y del banco de ensayo de motores.
- Medición de los parámetros eléctricos y mecánicos del MTI en dos condiciones: alimentando el MTI desde la red eléctrica y desde el SF.
- Las mediciones se realizaron variando la carga desde el 5% hasta el 100% de la potencia nominal con un incremento del 5%.
- Procesamiento de los datos:
- En este paso se calculó la eficiencia y se realizaron los análisis estadísticos de las mediciones.
- Interpretación de los resultados.

### 2.2.2 Modelación del MTI objeto de estudio en condiciones reales de operación.

- Medición de un MTI en una aplicación real y estimación de la variación de la carga.
- Obtención de los modelos matemáticos de la potencia eléctrica en función del factor de carga del MTI conectado a la red eléctrica y al SF.

- Estimación de la potencia eléctrica del MTI correspondiente a la variación de la carga de una aplicación real en las dos condiciones.
- Estimación del consumo de energía en las dos condiciones.
- Estimación de las pérdidas de energía en el MTI debido a la alimentación desde el SF.

A continuación, se explican los pasos descritos.

Los experimentos se desarrollaron en dos condiciones, en la primera condición se alimentó el MTI desde la red eléctrica y en la segunda condición el MTI se alimentó desde el SF. En cada condición se varió la carga con el control del freno desde el 5% de la carga (55 W) hasta el 100% (1100 W) con incrementos del 5%. A su vez se midieron los parámetros eléctricos con el analizador de redes y los parámetros mecánicos con el propio control de freno y la ayuda de la tarjeta de adquisición de datos. En la Tabla 4 se muestran los parámetros medidos.

**Tabla 4**

*Parámetros Eléctricos y Mecánicos Medidos y Registrados para Análisis*

<b>Parámetros</b>	<b>Tipo de Parámetro</b>	<b>Instrumentos de Medición</b>
Momento en Nm	Mecánico	Control del freno y tarjeta de adquisición de datos
Velocidad en rpm	Mecánico	Control del freno y tarjeta de adquisición de datos
Tensión de Línea (Vab, Vbc y Vca) en V	Eléctrico	Analizador de redes
Corriente de Línea de Línea (Ia, Ib e Ic) en A	Eléctrico	Analizador de redes
Potencia Eléctrica ( $P_{elec}$ ) en W	Eléctrico	Analizador de redes
Factor de Potencia en p.u.	Eléctrico	Analizador de redes
Distorsión Armónica Total de Tensión (THDV) en %	Eléctrico	Analizador de redes
Factor K en %	Eléctrico	Analizador de redes

Fuente: Elaboración propia

Los armónicos fueron analizados mediante el THDV y el factor de K. Como se observa en (1) y (2), con el THDV se evaluaron los armónicos de tensión mientras que con el factor K se evaluaron los armónicos de corriente (Kalair et al., 2017), (IEEE, 2014).

$$THDV = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} V_k^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (1)$$

$$Factor\ k = \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{I_k}{I_{rms}} \right)^2 \cdot k^2 \quad (2)$$

En cada factor de carga se registraron 30 segundos de mediciones con intervalos de un segundo. Durante el procesamiento de los datos se sincronizaron los parámetros eléctricos y mecánicos medidos al mismo tiempo. A partir de las mediciones, la potencia mecánica, el factor de carga y la eficiencia se calculan como (Lu, Habetler, & Harley, 2006, 2008), (Sousa Santos et al., 2019).

$$P_{mec} = \frac{T \cdot n}{9.549} \quad (3)$$

$$F_c = 100 \cdot \frac{P_{mec}}{P_n} \quad (4)$$

$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{mec}}{P_{elec}} \quad (5)$$

Las mediciones se realizaron diariamente durante una semana y la evaluación en la condición 2 (es decir, la alimentación desde el SF) se realizó en horarios comprendidos entre 10:00 am – 3:00 pm, donde la radiación solar permitió la generación de energía eléctrica suficiente para accionar el MTI.

El otro estudio que se realizó fue la modelación del MTI operando en un régimen de carga de momento constante y carga variable correspondiente a una aplicación real. Esto se realizó a

partir de la medición en campo durante cinco horas de un MTI y haciendo coincidir el comportamiento de la potencia mecánica con el de la potencia eléctrica medida. Esto se cumple en aplicaciones de momento constante y carga variable (Chapman, 2011).

Posteriormente se simuló el MTI objeto de estudio operando con la variación de la carga obtenido de la medición real y se comparó el consumo cuando se alimenta desde la red eléctrica en relación con la alimentación desde el SF. Esto permitió estimar el impacto de los SF en la eficiencia del MTI en un escenario real de operación.

### Capítulo 3.

#### Resultados de la evaluación del mti conectado a la red eléctrica y al sf

#### 3.1 Resultados de la evaluación de la operación del MTI conectado a la red eléctrica y al SF.

Las mediciones del MTI alimentado desde la RED y el SF se analizaron estadísticamente y se promediaron teniendo en cuenta la poca variación en los parámetros. En la tabla 5 se presenta las mediciones del MTI operando desde la RED y en la tabla 6 las mediciones del MTI alimentado desde el SF.

**Tabla 5**

*Mediciones del MTI Conectado a la Red Eléctrica*

FC (%)	Mom. (Nm)	Vel. rpm)	Pmec (W)	V (V)	I (A)	Pelec (W)	FP (pu)	THDV (%)	Factor K (%)	Efic (%)
5	0,15	3564	57	219	2,3	226	0,26	0,88	0,14	25,4
10	0,31	3560	114	219	2,3	295	0,33	0,88	0,13	38,8
15	0,46	3555	171	219	2,4	354	0,39	0,89	0,12	48,5
20	0,61	3551	228	219	2,4	415	0,46	0,89	0,11	55,0
25	0,77	3546	285	219	2,5	474	0,51	0,91	0,11	60,1
30	0,92	3540	341	219	2,5	530	0,56	0,91	0,10	64,5
35	1,07	3534	398	219	2,5	576	0,62	0,91	0,09	69,1
40	1,23	3528	454	219	2,6	634	0,65	0,91	0,08	71,6
45	1,38	3521	509	219	2,7	708	0,70	0,93	0,08	72,0
50	1,54	3514	565	219	2,8	752	0,72	0,93	0,07	75,1
55	1,69	3507	620	219	2,8	807	0,76	0,93	0,07	76,8
60	1,84	3499	675	218	2,9	863	0,78	0,92	0,06	78,2

65	2,00	3491	730	218	3	903	0,80	0,94	0,06	80,8
70	2,15	3483	784	218	3,2	992	0,82	0,92	0,06	79,0
75	2,30	3474	838	218	3,3	1035	0,82	0,95	0,06	81,0
80	2,46	3464	891	218	3,4	1089	0,84	0,95	0,06	81,8
85	2,61	3455	944	218	3,6	1142	0,83	0,94	0,07	82,6
90	2,76	3445	997	218	3,7	1178	0,84	0,94	0,08	84,6
95	2,92	3434	1049	218	4,1	1252	0,81	0,95	0,08	83,8
100	3,07	3423	1101	218	4,2	1288	0,81	0,95	0,10	85,4

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6**

*Mediciones del MTI Conectado al SFs*

FC (%)	Mom. (Nm)	Vel. rpm)	Pmec (W)	V (V)	I (A)	Pelec (W)	FP (pu)	THDV (%)	Factor K (%)	Efic (%)
5	0,15	3564	57	222	2,6	246	0,24	2,87	1,52	23,3
10	0,31	3560	114	222	2,6	312	0,32	2,90	1,44	36,6
15	0,46	3555	171	222	2,5	369	0,38	2,98	1,44	46,5
20	0,61	3551	228	222	2,5	432	0,44	2,89	1,53	52,8
25	0,77	3546	285	222	2,6	491	0,49	2,98	1,38	58,0
30	0,92	3540	341	222	2,6	544	0,54	3,01	1,40	62,7
35	1,07	3534	398	221	2,7	596	0,58	2,94	1,42	66,7
40	1,23	3528	454	221	2,7	659	0,63	3,06	1,37	68,8
45	1,38	3521	509	221	2,8	723	0,67	3,12	1,39	70,5
50	1,54	3514	565	221	2,9	772	0,70	3,18	1,40	73,2
55	1,69	3507	620	221	3	828	0,72	3,14	1,39	74,9
60	1,84	3499	675	221	3,1	884	0,76	3,20	1,40	76,4
65	2,00	3491	730	221	3,2	930	0,77	3,20	1,36	78,5
70	2,15	3483	784	221	3,3	1015	0,80	3,26	1,34	77,2

75	2,30	3474	838	221	3,4	1060	0,81	3,25	1,39	79,0
80	2,46	3464	891	221	3,6	1115	0,82	3,28	1,35	79,9
85	2,61	3455	944	221	3,8	1170	0,81	3,27	1,33	80,7
90	2,76	3445	997	221	3,9	1213	0,81	3,29	1,35	82,2
95	2,92	3434	1049	221	4,2	1293	0,81	3,35	1,30	81,1
100	3,07	3423	1101	221	4,4	1321	0,79	3,35	1,25	83,3

Fuente: Elaboración propia

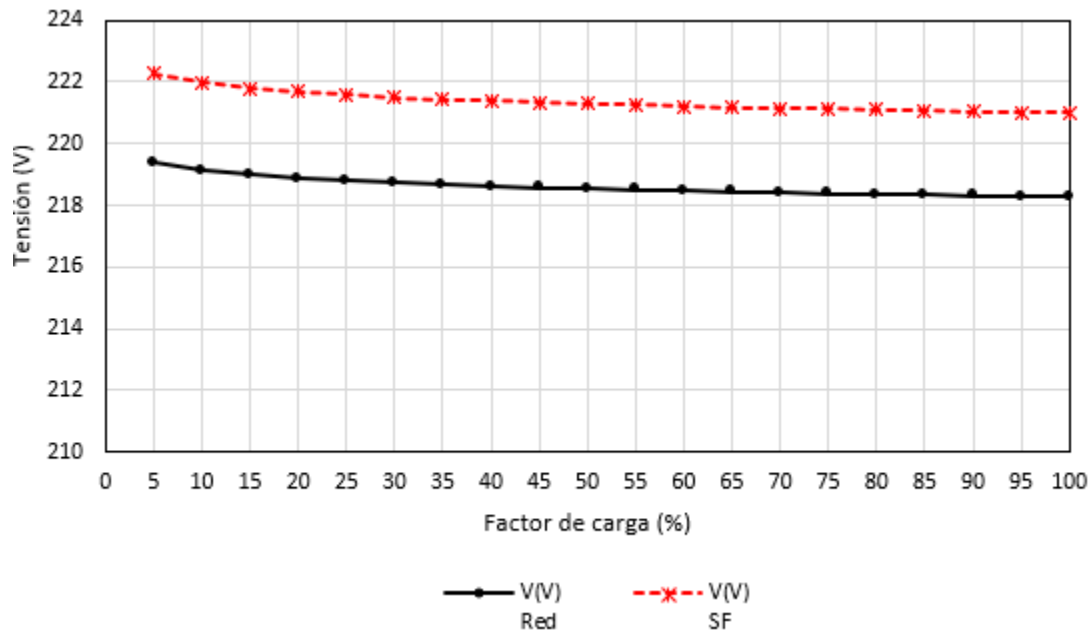
Como se observa en las tablas 5 y 6, en cada factor de carga los parámetros mecánicos son iguales en las dos condiciones, mientras que los parámetros eléctricos varían debido a que las condiciones de suministro eléctrico eran diferentes.

A continuación, se presentan y comparan los gráficos de los parámetros eléctricos. En la figura 12 se muestra el comportamiento de la tensión en las dos condiciones.



**Figura 12**

*Tensión de Alimentación del MTI Conectado a la Red Eléctrica y al SF*



Fuente: Elaboración propia

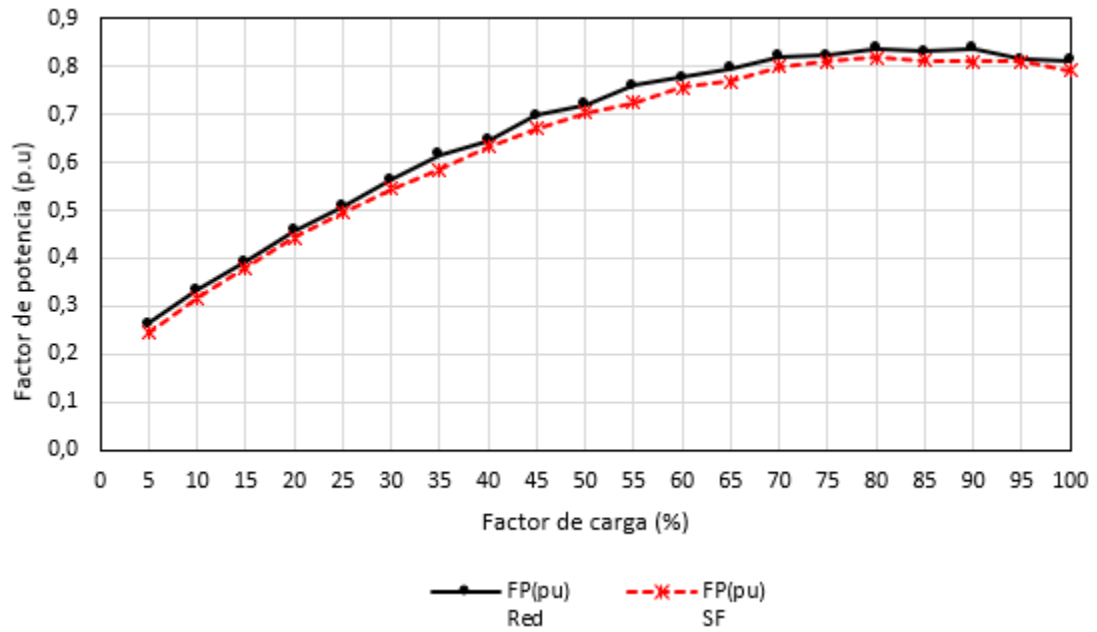
En la figura 12 se observa que la tensión del SF es mayor que la de la red eléctrica. En promedio la tensión del SF es superior en 1,2% y 2,8 V provocado por los condensadores que usan los SF en los inversores CC/CA (Hu & Gong, 2015). El incremento de la tensión sin regulación puede dañar sistemas de control y de automatización que puedan alimentar a los motores e incrementar las pérdidas de núcleo y el consumo de la potencia reactiva (Chuang, Li, & Lee, 2019).

En la figura 13 se puede observar que el factor de potencia del MTI alimentado desde el SF es menor en relación con la alimentación desde la red eléctrica debido al incremento de la tensión de la alimentación provocado por el inversor. En una industria con muchos MTI este

efecto provoca la afectación del factor de potencia total del sistema y la penalización en la facturación.

**Figura 13**

*Factor de Potencia Medidos en el MTI Conectado a la Red Eléctrica y al SF*

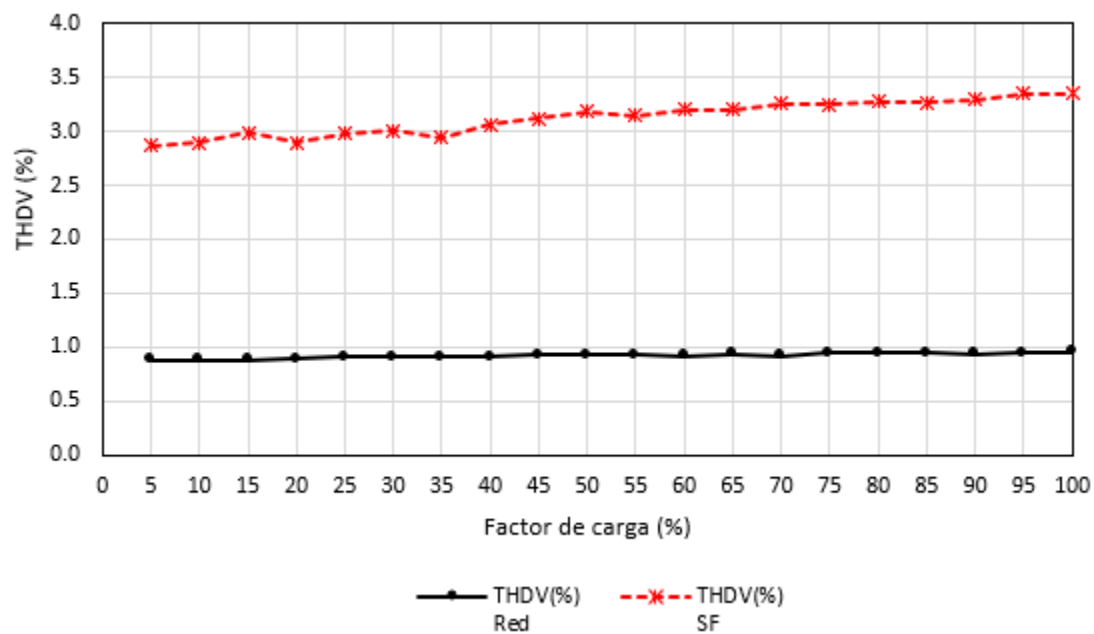


Fuente: Elaboración propia

En las figuras 14 y 15 se muestran el comportamiento del TDH de tensión que caracteriza a los armónicos de tensión y el factor k que caracteriza a los armónicos de corriente respectivamente.

**Figura 14**

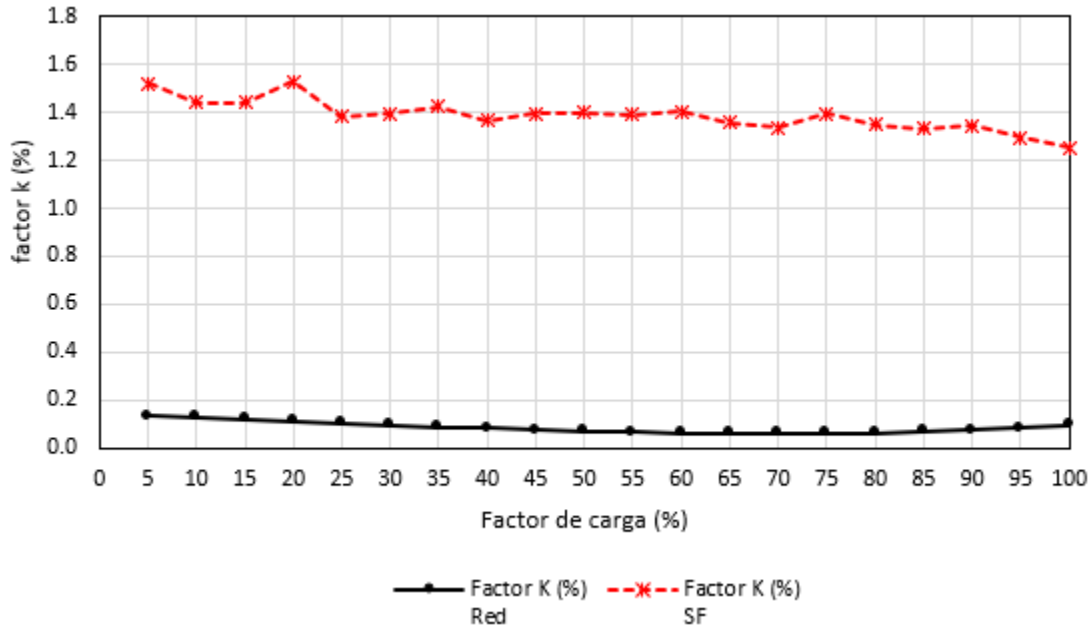
*THD de Tensión en el MTI Conectado a la Red y al SF*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 15**

*Factor K Medidos en el MTI Conectado a la Red y al FV*



Fuente: Elaboración propia

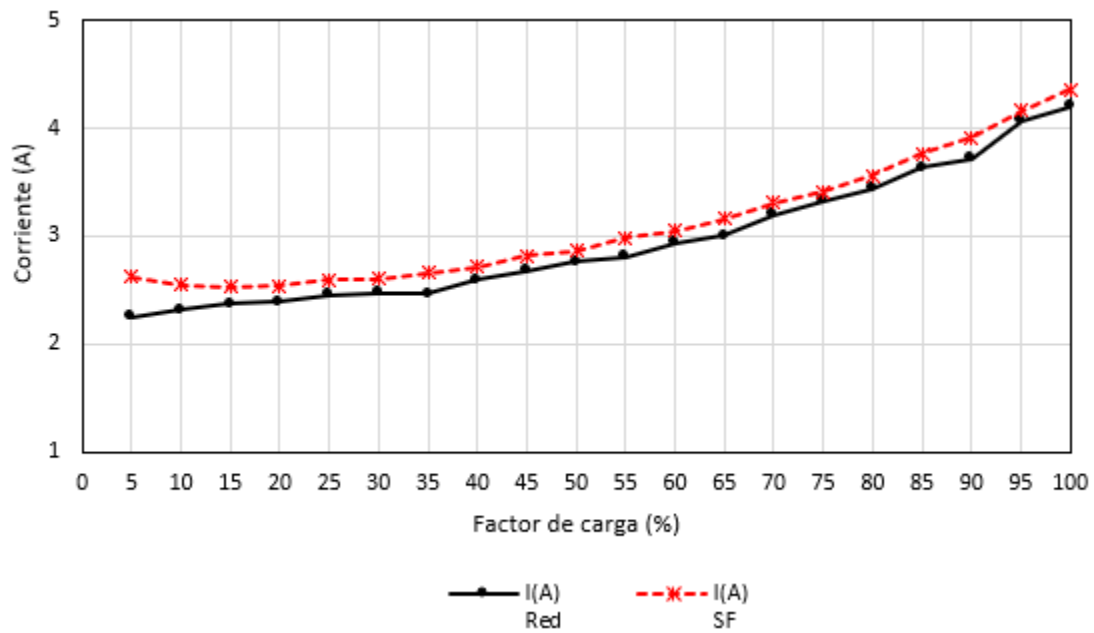
En la figura 14 se observa que el THDV con la alimentación desde el SF es muy superior a la alimentación desde la Red. Mientras que el THDV desde la alimentación de la Red no supera el 1%, con la alimentación del SF es superior al 2,9% y alcanza hasta el 3,4%, con estos valores en un estudio presentado en (Sousa Santos et al., 2019), se evidencia una reducción de la eficiencia superior al 1,5% en un MTI. En la figura 15, por su parte, se evidencia que el factor k generado por el SF también es muy superior al de la red eléctrica, pues mientras que en la red eléctrica ese valor no supera el 0,2%, en el SF es mayor al 1,3% y llega hasta el 1,5%. Estudios demuestran que cuando el factor k es superior a 1, se presentan pérdidas de cobre y en los componentes magnéticos como resultado de los armónicos (Gómez, Miguel, Córdova, Alfonso, & Salinas, 2016). Los armónicos de tensión y corriente medidos en la alimentación desde el SF

se deben a que en el proceso de conversión de DC-AC intervienen dispositivos no lineales como transistores y tiristores que distorsionan la forma de onda (Akin, Orguner, Toliyat, & Rayner, 2008).

En las figuras 16 y 17 se presentan el consumo de corriente de potencia eléctrica del MTI cuando se alimenta directamente desde la red eléctrica y desde el SF.

**Figura 16**

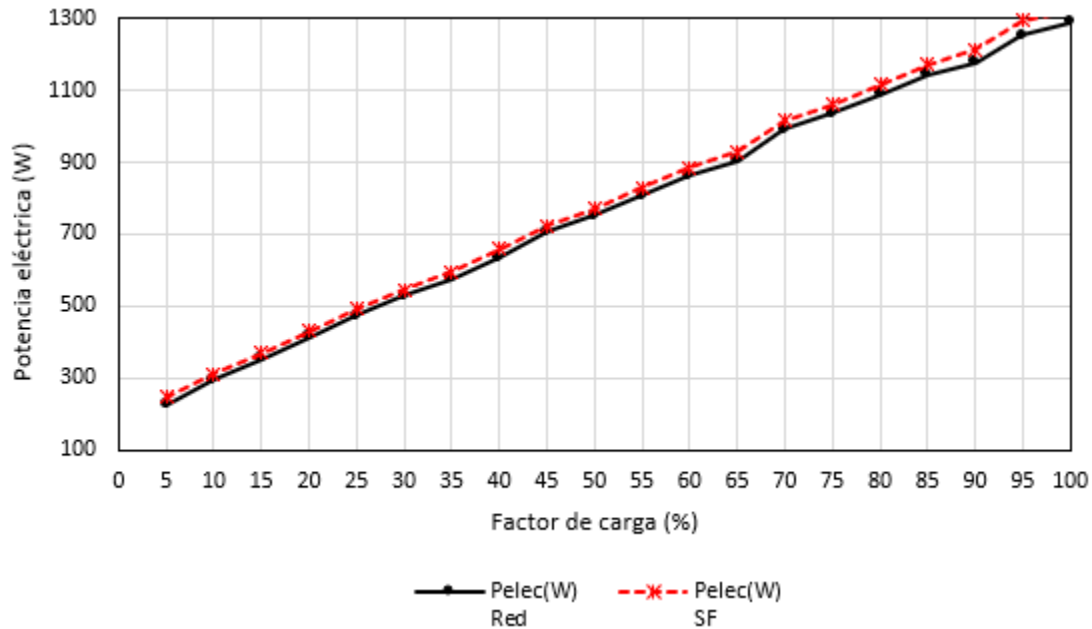
*Consumo de Corriente del MTI Conectado a la Red Eléctrica y al SF*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 17**

*Demanda de Potencia Eléctrica del MTI Conectado a la Red Eléctrica y al SF*



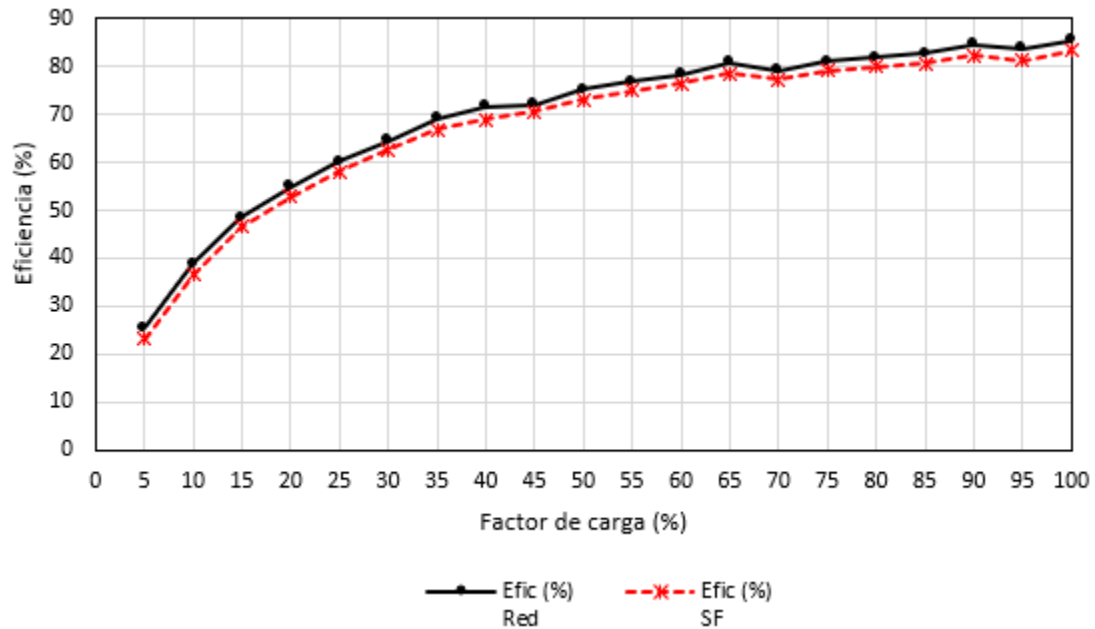
Fuente: Elaboración propia

En la figura 16 se evidenció el aumento del consumo de corriente del MTI entre 0,1 A y 0,4 A cuando fué alimentado desde el SF en relación con la alimentación desde la red eléctrica. El incremento del consumo de corriente se reflejó en el aumento de la potencia eléctrica entre 14,9 W y 40,8 W mostrado en la figura 17. El aumento del consumo de corriente y de la potencia eléctrica en el MTI alimentado desde el SF se debe al efecto de los armónicos de tensión y corriente que incrementa las pérdidas en el MTI. Por lo tanto, para accionar la misma carga, el MTI debe de demandar más corriente y potencia eléctrica en relación cuando se alimenta directamente desde la red eléctrica (Vladimir Sousa et al., 2017).

En la figura 18 se muestra el comportamiento de la eficiencia del MTI cuando se alimenta desde el SF y desde la red eléctrica.

**Figura 18**

*Eficiencia del MTI Conectado a la Red Eléctrica y al SF*



Fuente: Elaboración propia

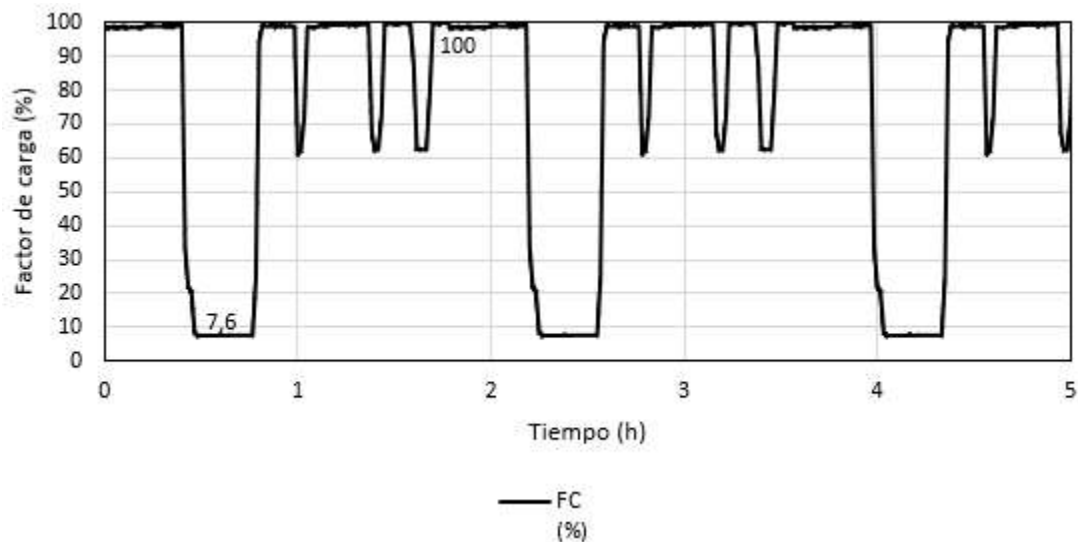
Como se muestra en la figura 18 y en las tablas 5 y 6, el MTI alimentado desde el SF presentó una menor eficiencia de operación en relación con la alimentación desde la red eléctrica. La reducción de la eficiencia varía entre un 1,5% y 2,7% y se debe al efecto de los armónicos de tensión y corriente generados por el SF. Este resultado coincide en estudios como los reportados en (V. Sousa, Viego, Gomez, Quispe, & Balbis, 2016) donde se evalúa el efecto de los armónicos en la eficiencia de los MTI.

### 3.2 Modelación del MTI en una aplicación real

El MTI objeto de estudio se modeló con un régimen de carga correspondiente a una aplicación real durante cinco horas de operación. Este número de horas se correspondió con el potencial de generación de energía con SF en regiones de alta incidencia de radiación solar como Barranquilla, Colombia (Noriega-Angarita et al., 2016). En la figura 19 se muestra el régimen de carga analizado, como se observa varía entre el 7,6% y el 100% de la potencia nominal.

**Figura 19**

*Factor de Carga Modelado en el MTI Objeto de Estudio*



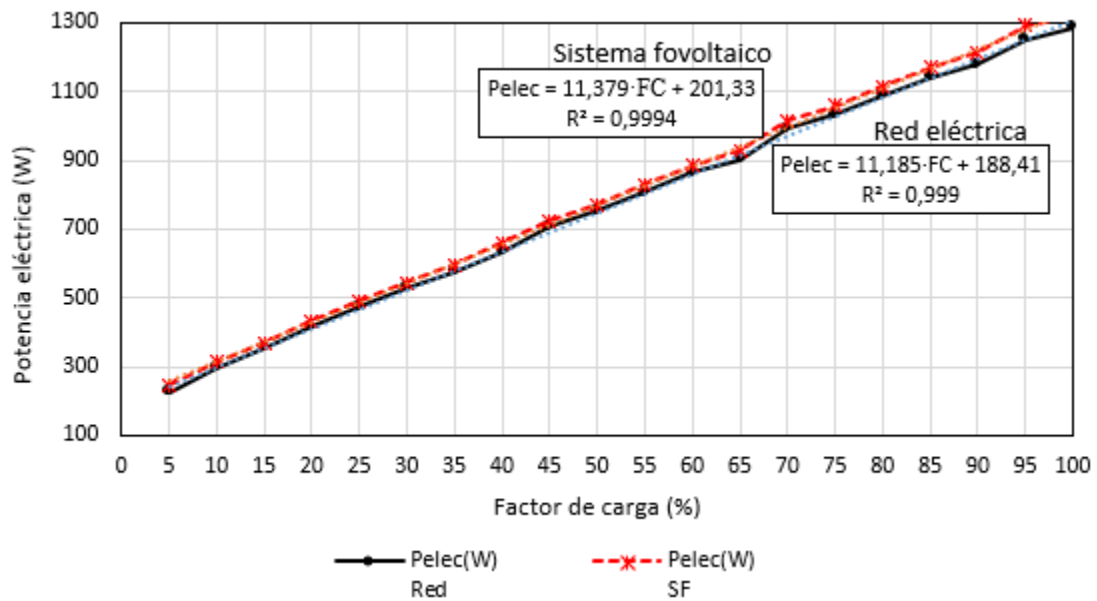
Fuente: Elaboración propia

Para estimar la potencia eléctrica demandada por el MTI cuando se alimentó desde la red eléctrica y el SF, se obtuvo un modelo matemático de regresión lineal para las dos condiciones a partir de los datos experimentales. En la figura 20 se presenta los modelos de regresión lineal.



**Figura 20**

*Modelos de Regresión Lineal de la Potencia Eléctrica del MTI Alimentado desde la Red Eléctrica y el SF.*

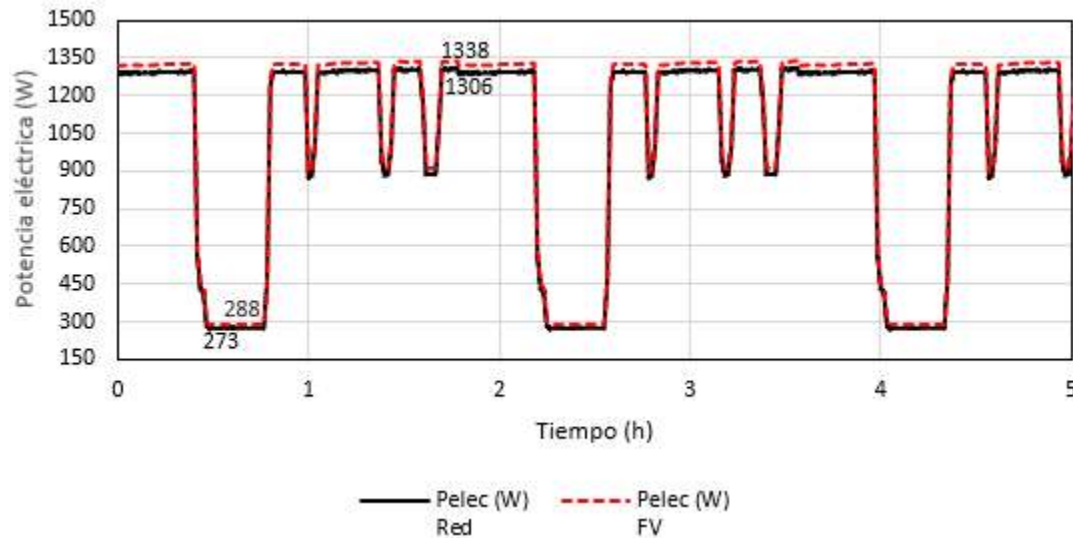


Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 20, la relación obtenida en los modelos de regresión lineal de la potencia eléctrica vs factor de carga se considera estadísticamente fuerte, pues el índice de correlación es mayor a 0,8 en los dos casos (Cabello Eras et al., 2016). En la figura 21 se muestra el comportamiento de la demanda de potencia eléctrica correspondientes al factor de carga de la figura 19 obtenido mediante los modelos de regresión lineal mostrados en la figura 20.

**Figura 21**

*Demanda de Potencia Eléctrica del MTI Conectado a la Red Eléctrica y al SF Durante Cinco Horas de Operación.*



Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 21 la potencia eléctrica demandada por el MTI alimentado desde el SF fue superior al MTI cuando se alimenta desde la red eléctrica. En el caso de la alimentación de la red eléctrica la potencia eléctrica varía entre 273 W y 1306 W, mientras que cuando se alimenta desde el SF varía entre 288 W y 1338 W.

A partir del comportamiento de la demanda de potencia eléctrica se calculó el consumo de energía en las dos condiciones y las pérdidas de energía cuando el MTI se alimentó desde el SF aplicando las ecuaciones (6), (7) y (8) (Angarita et al., 2019).

$$E_{red} = \int_0^5 P_{elec(red)} \cdot dt \quad (6)$$

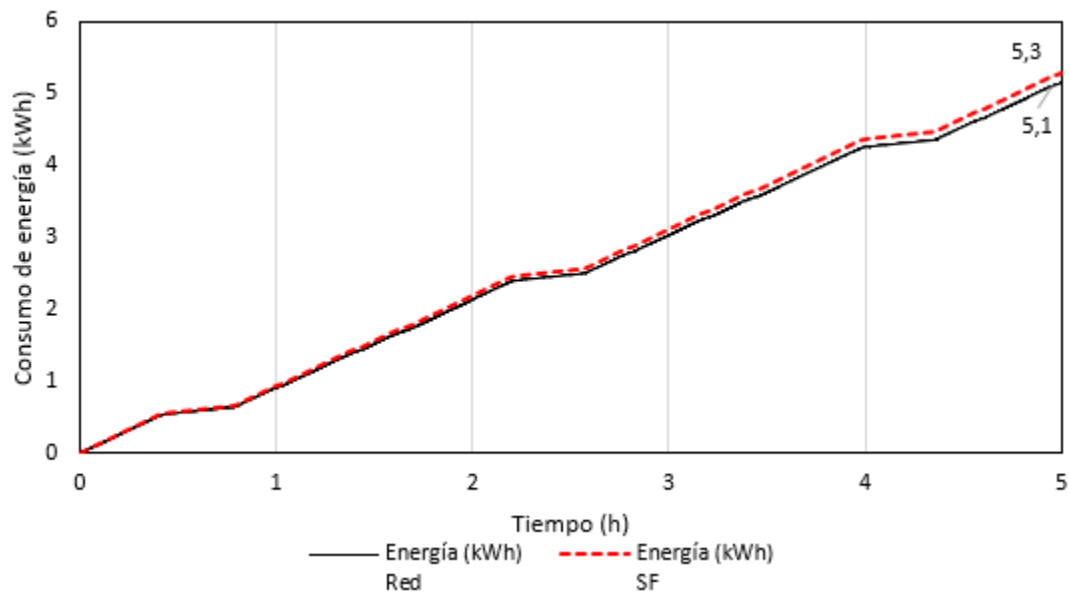
$$E_{sf} = \int_0^5 P_{elec(fv)} \cdot dt \quad (7)$$

$$DE = 100 \left( 1 - \frac{E_{red}}{E_{fv}} \right) \quad (8)$$

dónde:  $E_{red}$  es la energía consumida por el MTI cuando se alimenta desde la red eléctrica en (W),  $E_{sf}$  es la energía consumida por el MTI cuando se alimenta desde el sistema fotovoltaico en (W) y DE es la diferencia en el consumo de energía en (%). En la figura 22 se muestra el consumo de energía durante cinco horas de operación cuando el MTI se alimentó desde la red eléctrica y desde el SF.

### Figura 22

*Consumo de Energía por el MTI Conectado a la Red Eléctrica y al SF Durante Cinco Horas de Operación.*



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7 se muestra el consumo de energía durante las cinco horas, durante un año teniendo en cuenta una operación de 300 días al año y el porcentaje de pérdidas de energía de pérdidas de energía cuando se alimentó desde el SF.

**Tabla 7**

*Pérdidas de Energía Causadas cuando MTI es Alimentado con Sistema FV*

Condición	Energía (kWh/día)	Energía (kWh/año)	Diferencia (%)	Diferencia (kWh/año)
Red Eléctrica	5,1	1543	2,6	41
SF	5,3	1584		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7 se observa que el incremento en el consumo de energía por la alimentación del SF es del 2,6%. Este incremento es llamativo, si se tiene en cuenta que, en los MTI, se considera un logro importante reducir el consumo en valores iguales o superiores al 1% (Waide & Brunner, 2011). Esto se debe al uso intensivos que tienen los MTI, sobre todo en el sector industrial, donde es común la operación más de 6000 h/año (Hasanuzzaman, Rahim, Saidur, & Kazi, 2011).

### 3.3 Criterios de selección de sistemas fotovoltaicos que alimenten MTI

A partir de los resultados obtenidos, donde se pudo demostrar que con la alimentación de un SF pueden presentar un incremento en el consumo superior al 2% en los MTI, se recomienda tener en cuenta los siguientes criterios técnicos, fundamentalmente en sistemas eléctricos donde predominen MTI:

1. Usar reguladores de tensión a la salida del convertidor para garantizar que la tensión de suministro esté próximo a la tensión nominal de los MTI.

Con esta medida se evita exceso de tensión que aumentan las pérdidas de núcleo o puede dañar dispositivos de control automático (Adekitan, Adetokun, Shomefun, & Aligbe, 2018).

2. Usas filtros de armónicos o inversores superiores a 6 pulsos.

Con esta medida se evita alimentar a los MTI con niveles de armónicos de tensión y corrientes que aumentan las pérdidas, el sobrecalentamiento, el consumo de la energía y la reducción de la eficiencia y la vida en el MTI (Sousa Santos et al., 2019).

## Conclusiones

La revisión del estado de arte sobre FRE y SFs evidenciaron que, si bien el uso de energías alternativas tiene beneficios en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que producen las fuentes de energía derivadas del carbón, también constituyen un reto para la operación de los sistemas eléctricos.

Los estudios destacan la afectación que han producido los SFs en la operación de circuitos de distribución, principalmente por problemas de inestabilidad en la generación de energía, de regulación de frecuencia, generación de armónicos e inestabilidad de potencia reactiva. Estos estudios, sin embargo, no analizan la influencia directa que puede tener los SFs en la operación de los MTI, lo que motivó la presente investigación.

En el estudio desarrollado, donde se comparó el comportamiento de los parámetros electromecánicos y la eficiencia energética de un MTI de 1.1 kW alimentado desde la red eléctrica y desde un SF, se demostró que, con la alimentación desde el SF, se generaron problemas de regulación de tensión y de incremento de armónicos de tensión y corriente. Estos problemas, provocados por los condensadores y elementos no lineales del inversor, produjeron la reducción del factor de potencia, el aumento de la demanda de la corriente, de la potencia eléctrica, y la reducción de la eficiencia operacional del MTI hasta en un 2,7%, comparado con la alimentación desde la red eléctrica. El mismo MTI modelado en condiciones reales de variación de la carga, consumió 2,6 % de energía más cuando se alimentó desde el SF, en comparación con la alimentación desde la red eléctrica.

Teniendo en cuenta estos resultados, la presente investigación pretende llamar la atención a las entidades involucradas en la instalación y operación de SF, para que consideren la calidad de

la energía que proveen estos sistemas, cuando se suministra energía en circuitos donde predomine MTI, pues se puede incrementar el consumo de energía considerablemente.

### Referencias

- Adekitan, A. I., Adetokun, B., Shomefun, T., & Aligbe, A. (2018). Cost implication of line voltage variation on Three Phase Induction Motor operation. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 16(4).  
<https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v16i4.9628>
- Aguirre-Mendoza, A. M., Díaz-Mendoza, C., & Pasqualino, J. (2019). Renewable energy potential analysis in non-interconnected islands. Case study: Isla Grande, Corales del Rosario Archipelago, Colombia. *Ecological Engineering*, 130(December 2016), 252–262.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.020>
- Akin, B., Orguner, U., Toliyat, H. A., & Rayner, M. (2008). Low order PWM inverter harmonics contributions to the inverter-fed induction machine fault diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(2). <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911954>
- Al-Badri, M., Pillay, P., & Angers, P. (2017). A Novel in Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-Phase Induction Motors Operating with Distorted Unbalanced Voltages. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(6), 5338–5347.  
<https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2728786>
- Alger, P. L., & Arnold, R. E. (1976). The History of Induction Motors in America. *Proceedings of the IEEE*, 64(9), 1380–1383. <https://doi.org/10.1109/PROC.1976.10329>
- Angarita, E. N., Eras, J. J. C., Herrera, H. H., Santos, V. S., Morejón, M. B., Ortega, J. I. S., & Gutiérrez, A. S. (2019). Energy planning and management during battery manufacturing. *Gestao e Producao*, 26(4), 1–14. <https://doi.org/10.1590/0104-530X3928-19>



- Azzouz, M. A., Farag, H. E., & El-Saadany, E. F. (2017). Real-time fuzzy voltage regulation for distribution networks incorporating high penetration of renewable sources. *IEEE Systems Journal*, *11*(3), 1702–1711. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2330606>
- Basu, M. (2019). Optimal generation scheduling of hydrothermal system with demand side management considering uncertainty and outage of renewable energy sources. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.069>
- Benhabib, M. C., Myrzik, J. M. A., & Duarte, J. L. (2007). *Harmonic effects caused by large scale PV installations in LV network*. <https://doi.org/10.1109/EPQU.2007.4424134>
- Bhaskar, M. S., Padmanaban, S., & Blaabjerg, F. (2017). A multistage DC-DC step-up self-balanced and magnetic component-free converter for photovoltaic applications: Hardware implementation. *Energies*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/en10050719>
- Bonnett, A. H., Glatt, H., & Hauck, S. (2016). Effect of Power Deviations on Squirrel-Cage Induction Motors: Addressing the Impact of Voltage and Frequency Variations. *IEEE Industry Applications Magazine*, *22*(6), 39–47. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2015.2459113>
- Brahma, S. M., & Girgis, A. A. (2004). Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *19*(1), 56–63. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820204>
- Cabello Eras, J. J., Sousa Santos, V., Sagastume Gutiérrez, A., Guerra Plasencia, M. Á., Haeseldonckx, D., & Vandecasteele, C. (2016). Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 803–812. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.192>

- Chapman, S. (2011). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Chicco, G., Schlabbach, J., & Spertino, F. (2009). Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations. *Solar Energy*, 83(7), 1026–1039. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.01.005>
- Chidurala, A., Saha, T. K., & Mithulananthan, N. (2016). Harmonic impact of high penetration photovoltaic system on unbalanced distribution networks - Learning from an urban photovoltaic network. *IET Renewable Power Generation*, 10(4), 485–494. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0188>
- Chirindo, M., Khan, M. A., & Barendse, P. S. (2016). Considerations for Nonintrusive Efficiency Estimation of Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(2), 741–749. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2477801>
- Chuang, H. C., Li, G. De, & Lee, C. T. (2019). The efficiency improvement of AC induction motor with constant frequency technology. *Energy*, 174, 805–813. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.019>
- Dib, M., Ramzi, M., & Nejmi, A. (2019). Voltage regulation in the medium voltage distribution grid in the presence of renewable energy sources. *Materials Today: Proceedings*, 13, 739–745. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.035>
- Donolo, P., Pezzani, M., Bossio, G., Quispe, E. C., Valencia, D., & Sousa, V. (2018). Impact of Voltage Waveform on the Losses and Performance of Energy Efficiency Induction Motors. *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings*, 20–23. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564677>

- Duman, T., Marti, S., Moonem, M. A., Kader, A. A. R. A., & Krishnaswami, H. (2017). A modular multilevel converter with power mismatch control for grid-connected photovoltaic systems. *Energies*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/en10050698>
- El-Kharashi, E., Massoud, J. G., & Al-Ahmar, M. A. (2019). The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency on the performance of single and cascaded induction motors. *Energy*, *181*, 561–575. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.05.169>
- Eras, J. J. C., Morejón, M. B., Gutiérrez, A. S., García, A. P., Ulloa, M. C., Martínez, F. J. R., & Rueda-Bayona, J. G. (2019). A look to the electricity generation from non-conventional renewable energy sources in Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *9*(1), 15–25. <https://doi.org/10.32479/ijEEP.7108>
- Fang, Y., Jia, K., Yang, Z., Li, Y., & Bi, T. (2019). Impact of Inverter-Interfaced Renewable Energy Generators on Distance Protection and an Improved Scheme. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *66*(9), 7078–7088. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2873521>
- Fernandes, D., Almeida, R., Guedes, T., Sguarezi Filho, A. J., & Costa, F. F. (2017). State feedback control for DC-photovoltaic systems. *Electric Power Systems Research*, *143*, 794–801. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.037>
- Freddy, T. K. S., Lee, J.-H., Moon, H.-C., Lee, K.-B., & Rahim, N. A. (2017). Modulation Technique for Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters with Reactive Power Capability. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *64*(9), 6989–6999. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2686366>
- Gnaciński, P., Hallmann, D., Pepliński, M., & Jankowski, P. (2019). The effects of voltage subharmonics on cage induction machine. *International Journal of Electrical Power &*

*Energy Systems*, 111, 125–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.009>

Gómez, A., Miguel, J., Córdova, A., Alfonso, R., & Salinas, I. (2016). K factor estimation in distribution transformers using linear regression models. *Tecnura*, 20(48), 29–40.

<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a02>

Habib, A., Sou, C., Hafeez, H. M., & Arshad, A. (2018). Evaluation of the effect of high penetration of renewable energy sources (RES) on system frequency regulation using stochastic risk assessment technique (an approach based on improved cumulant).

*Renewable Energy*, 127, 204–212. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.04.063>

Hariri, A., & Faruque, M. O. (2014). *Impacts of distributed generation on power quality*.

<https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965404>

Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., Saidur, R., & Kazi, S. N. (2011). Energy savings and emissions reductions for rewinding and replacement of industrial motor. *Energy*, 36(1),

233–240. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.046>

Henao, F., Rodriguez, Y., Viteri, J. P., & Dyner, I. (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81–92.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.099>

Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., & Alonso-Gómez, V. (2019). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188(June), 426–

440. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.017>

Hernández, J. C., Ortega, M. J., De La Cruz, J., & Vera, D. (2011). Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed

generation. *Electric Power Systems Research*, 81(7), 1247–1257.

<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.03.012>

Hu, X., & Gong, C. (2015). A high gain input-parallel output-series DC/DC converter with dual coupled inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(3), 1306–1317.

<https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2315613>

IEA. (2018). Renewables Information 2018: Overview. *IEA Statistics*, 497. Retrieved from

[https://webstore.iea.org/download/direct/2260?fileName=Renewables\\_Information\\_2018\\_Overview.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2260?fileName=Renewables_Information_2018_Overview.pdf)

IEA. (2019). *World Energy Investment 2019*. Retrieved from

<https://webstore.iea.org/download/direct/2738?fileName=WEI2019.pdf>

IEC. (2010). *IEC 60034-1:2010. Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance*.

IEEE. (2009). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. In *IEEE Std 1159-2009* (Vol. 2009). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.5154067>

IEEE. (2014). IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control. *ANSI/IEEE Std. 519*, Vol. 2014, pp. 5–9.

<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>

IEEE Std 1159. (2019). IEEE Std 1159<sup>TM</sup>-2019: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Standard 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)*, Vol. 2019, pp. 1–98.

Jainy, G. C. (1964). The Effect of Voltage Waveshape on the Performance of a 3-Phase

Induction Motor. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83(6), 561–566.

<https://doi.org/10.1109/TPAS.1964.4766039>

Jie, B., Tsuji, T., & Uchida, K. (2017). Analysis and modelling regarding frequency regulation of power systems and power supply–demand-control based on penetration of renewable energy sources. *The Journal of Engineering*, 2017(13), 1824–1828.

<https://doi.org/10.1049/joe.2017.0646>

Kabiri, R., Holmes, D. G., McGrath, B. P., & Meegahapola, L. G. (2015). LV Grid Voltage Regulation Using Transformer Electronic Tap Changing, with PV Inverter Reactive Power Injection. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(4), 1182–1192. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2443839>

Kadir, A. F. A., Khatib, T., & Elmenreich, W. (2014). Integrating photovoltaic systems in power system: Power quality impacts and optimal planning challenges. *International Journal of Photoenergy*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/321826>

Kalair, A. R., Abas, N., Kalair, A. R., Saleem, Z., & Khan, N. (2017). Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152–1187. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.121>

Kermani, H. R., Dahraie, M. V., & Najafi, H. R. (2016). Frequency control of a microgrid including renewable resources with energy management of electric vehicles. *4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG 2016*, 114–118. <https://doi.org/10.1109/ICREDG.2016.7875905>

Kim, K., Park, H., & Kim, H. (2017). Real options analysis for renewable energy investment decisions in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(November 2016), 918–926. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.073>

- Kusakana, K. (2015). Operation cost minimization of photovoltaic-diesel-battery hybrid systems. *Energy*, 85, 645–653. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.002>
- Kwon, J. B., Wang, X., Blaabjerg, F., Bak, C. L., Wood, A. R., & Watson, N. R. (2016). Harmonic instability analysis of a single-phase grid-connected converter using a harmonic state-space modeling method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5), 4188–4200. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2581154>
- Kwon, J., Wang, X., Bak, C. L., & Blaabjerg, F. (2015). The modeling and harmonic coupling analysis of multiple-parallel connected inverter using Harmonic State Space (HSS). *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, 6231–6238. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310534>
- Langella, R., Testa, A., Meyer, J., Moller, F., Stiegler, R., & Djokic, S. Z. (2016). Experimental-Based Evaluation of PV Inverter Harmonic and Interharmonic Distortion Due to Different Operating Conditions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(10), 2221–2233. <https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2554378>
- Lee, S., Kim, J., An, D., & Hong, J. (2014). Equivalent Circuit Considering the Harmonics of Core Loss in the Squirrel-Cage Induction Motor for Electrical Power Steering Application. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11), 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2329316>
- Liang, X., & Andalib-Bin-Karim, C. (2018). Harmonics and Mitigation Techniques Through Advanced Control in Grid-Connected Renewable Energy Sources: A Review. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4), 3100–3111. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2823680>

- Lu, B., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2006). A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(4), 924–933. <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.876065>
- Lu, B., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2008). A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(6), 1666–1674. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2006297>
- Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Resolución CREG 030: Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional* (p. 27). p. 27. Retrieved from [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/\\$FILE/Creg030-2018.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/$FILE/Creg030-2018.pdf)
- Ministerio minas y energia, & UPME. (2016). *Guia práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014*. 28.
- Mohanty, P., Muneer, T., & Kolhe, M. (2016). *Solar Photovoltaic System Applications* (First; P. Mohanty, T. Muneer, & M. Kolhe, Eds.). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14663-8>
- Molina-García, Á., Mastromauro, R. A., García-Sánchez, T., Pugliese, S., Liserre, M., & Stasi, S. (2017). Reactive Power Flow Control for PV Inverters Voltage Support in LV Distribution Networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1), 447–456. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2625314>
- Monteiro, R. V. A., Guimarães, G. C., Moura, F. A. M., Albertini, M. R. M. C., & Albertini, M. K. (2017). Estimating photovoltaic power generation: Performance analysis of artificial



- neural networks, Support Vector Machine and Kalman filter. *Electric Power Systems Research*, 143, 643–656. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.050>
- Mu, C. X., Jin, J. X., & Xu, W. (2016). Adaptive frequency regulation strategy based integral sliding mode control for smart grid with renewable energy sources. *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2015 - Proceedings*, 391–392. <https://doi.org/10.1109/ASEMD.2015.7453627>
- NEMA. (2016). *ANSI/NEMA MG 1-2016 . Motors and Generators*.
- Noriega-Angarita, E., Sousa-Santos, V., Quintero-Duran, M., & Gil-Arrieta, C. (2016). Solar radiation prediction for dimensioning photovoltaic systems using artificial neural networks. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(4). <https://doi.org/10.21817/ijet/2016/v8i4/160804234>
- Nour, M., & Thirugnanam, P. (2017). Investigation of voltage and frequency variation on induction motor core and copper losses. *2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization, ICMSAO 2017*, 3(1), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2017.7934894>
- Ortega, M. J., Hernández, J. C., & García, O. G. (2013). Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations. *Electric Power Systems Research*, 96, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.11.003>
- Ortmeyer, T. H., Chakravarthi, K. R., & Mahmoud, A. A. (1985). The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(9), 2555–2563.

<https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.319019>

Pérez-Díaz, J. I., Chazarra, M., García-González, J., Cavazzini, G., & Stoppato, A. (2015).

Trends and challenges in the operation of pumped-storage hydropower plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, 767–784. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.029>

Pérez-Díaz, J. I., & Jiménez, J. (2016). Contribution of a pumped-storage hydropower plant to reduce the scheduling costs of an isolated power system with high wind power penetration. *Energy*, *109*, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.014>

Pierret, R. F. (1983). *Modular series on solid state devices. Volume I: Semiconductor fundamentals*. Addison-Wesley Publishing Company.

Quispe, E.C., López, I. D., Ferreira, F. J. T. E., & Sousa, V. (2018). Unbalanced voltages impacts on the energy performance of induction motors. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *8*(3), 1412–1422. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1412-1422>

Quispe, Enrique C., Lopez-Fernandez, X. M., Mendes, A. M. S., Marques Cardoso, A. J., & Palacios, J. A. (2013). Influence of the positive sequence voltage on the derating of three-phase induction motors under voltage unbalance. *Proceedings of the 2013 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013*, (100), 100–105. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556239>

Rajesh, K. S., Dash, S. S., Bayinder, Sridhar, R., & Rajagopal, R. (2017). Implementation of an adaptive control strategy for solar photo voltaic generators in microgrids with MPPT and energy storage. *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2016*, 766–771. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884439>

- Rawcliffe, G. H., & Menon, A. M. (1952). A simple new test for harmonic-frequency losses in a.c. machines. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1952(4), 119.  
<https://doi.org/10.1049/jiee-2.1952.0037>
- Ren, J., Hu, J., Deng, R., Zhang, D., Zhang, Y., & Shen, X. S. (2018). Joint Load Scheduling and Voltage Regulation in the Distribution System with Renewable Generators. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1564–1574.  
<https://doi.org/10.1109/TII.2017.2782725>
- Rodríguez-Urrego, D., & Rodríguez-Urrego, L. (2018). Photovoltaic energy in Colombia: Current status, inventory, policies and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(May), 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.065>
- Rönnerberg, S., & Bollen, M. (2016). Power quality issues in the electric power system of the future. *Electricity Journal*, 29(10), 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.11.006>
- Rueda-Bayona, J. G., Guzmán, A., Eras, J. J. C., Silva-Casarín, R., Bastidas-Arteaga, E., & Horrillo-Caraballo, J. (2019). Renewables energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology. *Journal of Cleaner Production*, 220, 529–543.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.174>
- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Sousa Santos, V., Hernández Herrera, H., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2018). Electricity management in the production of lead-acid batteries: The industrial case of a production plant in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1443–1458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.105>
- Saidur, R. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 877–898. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>

- Santos, V. S., Felipe, P. R. V., Sarduy, J. R. G., Lemozy, N. A., Jurado, A., & Quispe, E. C. (2015). Procedure for determining induction motor efficiency working under distorted grid voltages. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(1).  
<https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2335994>
- Sarkar, M. N. I., Meegahapola, L. G., & Datta, M. (2018). Reactive power management in renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization Algorithms. *IEEE Access*, 6, 41458–41489.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2838563>
- Shen, Y., Cui, M., Wang, Q., Shen, F., Zhang, B., & Liang, L. (2017). Comprehensive reactive power support of DFIG adapted to different depth of voltage sags. *Energies*, 10(6).  
<https://doi.org/10.3390/en10060808>
- Shim, J. W., Verbic, G., Zhang, N., & Hur, K. (2018). Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6193–6205.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2836157>
- Sidrach-De-Cardona, M., & Carretero, J. (2005). Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected pv-systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87(1–4), 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.08.016>
- Solanki, N., & Patel, J. (2017). Utilization of PV solar farm for Grid Voltage regulation during night; Analysis & control. *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016*.  
<https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853390>

- Sousa Santos, V., Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutierrez, A., & Cabello Ulloa, M. J. (2019). Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring. *Measurement*, *136*, 237–247.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.080>
- Sousa Santos, V., Quispe, E. C., Gomez Sarduy, J. R., Viego, P. R., Lemozy, N., Jurado, A., & Brugnoni, M. (2013). Bacterial Foraging Algorithm application for induction motor field efficiency estimation under harmonics and unbalanced voltages. *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, 1108–1111. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556235>
- Sousa, V., Viego, P. R., Gomez, J. R., Quispe, E. C., & Balbis, M. (2016). Shaft Power Estimation in Induction Motor Operating Under Unbalanced and Harmonics Voltages. *IEEE Latin America Transactions*, *14*(5), 2309–2315.  
<https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7530427>
- Sousa, Vladimir, Herrera, H. H., Quispe, E. C., Viego, P. R., & Gómez, J. R. (2017). Harmonic distortion evaluation generated by PWM motor drives in electrical industrial systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *7*(6), 3207–3216.  
<https://doi.org/10.11591/ijece.v7i6.pp3207-3216>
- SPOONER, T., & FOLTZ, J. P. (1929). Study of Noises in Electrical Apparatus. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, *48*(3), 747–751. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1929.5055283>
- Tang, Z. X., Lim, Y. S., Morris, S., Yi, J. L., Lyons, P. F., & Taylor, P. C. (2019). A comprehensive work package for energy storage systems as a means of frequency regulation with increased penetration of photovoltaic systems. *International Journal of*

*Electrical Power & Energy Systems*, 110, 197–207.

<https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2019.03.002>

Telukunta, V., Pradhan, J., Agrawal, A., Singh, M., & Srivani, S. G. (2018). Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 3(4), 365–379.

<https://doi.org/10.17775/cseejpes.2017.00030>

Testa, A., Akram, M. F., Burch, R., Carpinelli, G., Chang, G., Dinavahi, V., ... Xu, W. (2007). Interharmonics: Theory and Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(4), 2335–2348. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.905505>

Thao, N. G. M., & Uchida, K. (2017). A two-level control strategy with fuzzy logic for large-scale photovoltaic farms to support grid frequency regulation. *Control Engineering Practice*, 59, 77–99. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.11.006>

Tiwari, G.N., & Dubey, S. (2010). *Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications*. Royal Society of Chemistry.

Tungadio, D. H., & Sun, Y. (2019). Load frequency controllers considering renewable energy integration in power system. *Energy Reports*, 5, 436–453.

<https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2019.04.003>

UNFCCC. (2015). *Convention on Climate Change: Climate Agreement of Paris*. 1–25. Retrieved from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

UPME. (2015). *Plan Energetico Nacional Colombia: Ideario Energético 2050*. 184. Retrieved from [http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN\\_IdearioEnergetico2050.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf)

- UPME. (2016). Boletín Estadístico de Minas y energía 2012 – 2016. *Ministerio de Minas y Energía*, 200. Retrieved from [http://www1.upme.gov.co/simco/Documents/Boletin\\_Estadistico\\_2012\\_2016.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Documents/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf)
- Vita, V., Alimardan, T., & Ekonomou, L. (2016). The impact of distributed generation in the distribution networks' voltage profile and energy losses. *Proceedings - EMS 2015: UKSim-AMSS 9th IEEE European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation*, 260–265. <https://doi.org/10.1109/EMS.2015.46>
- Waide, P., & Brunner, C. U. (2011). Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. *Cedex, France: Int. Energy Agency*, 132. <https://doi.org/10.1787/5kkg52gb9gjd-en>
- Ye, Y., Qiao, Y., & Lu, Z. (2019). Revolution of frequency regulation in the converter-dominated power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 111, 145–156. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.04.066>
- Yu, Y., Konstantinou, G., Hredzak, B., & Agelidis, V. G. (2015). Operation of Cascaded H-Bridge Multilevel Converters for Large-Scale Photovoltaic Power Plants under Bridge Failures. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), 7228–7236. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2434995>
- Zerrahn, Alexander; Schill, W.-P. (2018). *On the economics of electrical storage for variable renewable energy sources*. 108, 259–279. Retrieved from <https://zenodo.org/record/1170555>
- Zhang, B., Hou, P., Hu, W., Soltani, M., Chen, C., & Chen, Z. (2016). A Reactive Power Dispatch Strategy with Loss Minimization for a DFIG-Based Wind Farm. *IEEE*

*Transactions on Sustainable Energy*, 7(3), 914–923.

<https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2509647>

Zhang, S., Mishra, Y., & Shahidehpour, M. (2017). Utilizing distributed energy resources to support frequency regulation services. *Applied Energy*, 206, 1484–1494.

<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.09.114>

Zhao, Y., Lu, M. L., & Yuan, Y. (2000). *Operation and maintenance integration to improve safety*. 24(2–7), 401–407. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00429-4](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00429-4)